



ISSN: 2658–5782

Номер 1–2

2022

МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

mfs.uimech.org





Синтез новых моделей микрогидродинамики в исследованиях лаборатории «Робототехника и управление в технических системах»¹

Даринцев О.В.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа

Робототехника является междисциплинарным научным направлением, поэтому при решении ряда задач возникает необходимость проведения исследований, характерных для других областей науки. Так, при синтезе новых типов оборудования в лаборатории «Робототехника и управление в технических системах» потребовались более точные характеристики отдельных узлов и агрегатов, что привело в итоге к проведению целого цикла работ по микрогидродинамике. Особый интерес в выполненных работах представляет разработка новых микроустройств, так как это предполагает построение единого комплекса новых математических и компьютерных моделей, связывающих гидродинамику, теорию упругости, процесс теплопереноса, параметрическую оптимизацию и теорию управления. Первыми были получены модели, описывающие движение поршня, закрепленного упругой пружиной, в трубе с учетом влияния сухого и вязкого видов трения. Методом факторного вычислительного эксперимента были получены аналитические зависимости для основной детали агрегата дозирования топлива – сервопоршня. Далее строились математические и компьютерные модели для проведения анализа течения жидкости через канал с изменяемой геометрией. По результатам моделирования была уточнена конструкция нового микромеханического устройства – пьезоэлектрического микронасоса, состоящего из упругой трубки и расположенных на ней кольцевых пьезоэлементов, последовательное колебание которых создает ненулевое среднее течение жидкости. В ходе адаптации модели была получена эффективная конструкция устройства сглаживания пульсаций расхода жидкости. Разрабатывались и просчитывались эти устройства для использования в системе жидкостного охлаждения капиллярного микрозахвата. Был проведен параметрический анализ процесса охлаждения горячей стороны элемента Пельтье микрозахвата при изменении следующих параметров схвата: размеры и форма радиатора, скорость течения охлаждающей жидкости и коэффициент теплопередачи. Результаты анализа колебаний температуры радиатора при нестационарном течении жидкости подтвердили предполагаемые зависимости эффективности охлаждения от выбранной геометрии радиатора и низкочастотных колебаний расхода жидкости.

Ключевые слова: микрогидродинамика, микроробототехника, гидросопротивление, динамически изменяемая геометрия канала, пьезоэлектрический микронасос, капиллярный микрозахват, жидкостная система охлаждения

1. Введение

Работы в области робототехники, а в последнее время, и в микромеханике, МЭМС, микроробототехнике, стимулируют увеличение объема исследований в смежных областях науки и техники. Ярким

примером такого влияния служит прогресс в микрогидродинамике, где не снижаются темп и объемы исследований последние три десятилетия [1]. Интерес к данной области связан с особенностями течения жидкости в микро- и наномасштабах, позволяющими разрабатывать устройства с новыми или даже не имеющими аналогов в традиционных макросистемах свойствами. Базовые характеристики микроустройств в значительной мере зависят от принципа работы и конструкции источников дав-

¹Работа выполнена за счет средств государственного задания № FWGZ-2019-0089.

ления — микронасосов, а также жиклеров (гидросопротивлений). Так, малые площади проходных сечений требуют более тщательной изоляции жидкости от рабочих элементов и полного отсутствия фактора загрязнения. Поэтому наибольшее распространение получили перистальтические насосы, так как в них контакт с рабочей жидкостью имеет только гибкая трубка [2], а подвижные элементы конструкции, являющиеся основным источником загрязнения, от жидкости изолированы. При расчетах производительности насоса в макросистемах используются только эмпирические формулы, не учитывающие специфику применения и масштабный фактор, не анализируется величина пульсаций расхода жидкости, поэтому для микросистем со сверхмалыми скоростями течения и величинами расходов требуется разработка более точных математических и компьютерных моделей.

С уменьшением масштаба системы число Рейнольдса становится малым, а число Пекле может оставаться большим. Малое число Рейнольдса ($Re = \rho uR/\mu \sim 1 \div 100$, где ρ — объемная плотность; u — скорость течения жидкости; R — ширина канала; μ — динамическая вязкость) подразумевает ламинарный характер течения, соответствующий как большинству технических микроустройств, так и биологическим системам [3]. А большое число Пекле ($Pe = uR/\chi \sim 10^2 \div 10^4$, где χ — коэффициент температуропроводности) означает, что конвективный (адвективный) перенос тепла преобладает над диффузионным [4], следовательно, в микроустройствах (микротеплообменник, система охлаждения, микрозахват) необходимо учитывать оба механизма теплопереноса [5].

Интенсивный рост производства микроэлектромеханических систем и широкое внедрение микророботов и микротехнологических комплексов является весомым стимулом для разработки новых перспективных устройств, обеспечивающих бережное манипулирование микрокомпонентами. Сотрудниками лаборатории «Робототехника и управление в технических системах» (РУТС) разработан и исследуется капиллярный микрозахват [6–8] для манипуляций с плоскими микрообъектами и мембранами, обладающими достаточной площадью плоской стороны, но недостаточной толщиной, для надежного и неразрушающего удержания пальцевыми захватами [9]. Создание макета данного микрозахвата, построенного на базе миниатюрного варианта термоэлектрического модуля (элемента Пельтье) [10], предполагает использование жидкостного охлаждения для отвода тепла от горячей поверхности элемента Пельтье.

В работе [11] проведен анализ энергоэффективности использования активного охлаждения термоэлектрического модуля (ТЭМ) с помощью активной воздушной или жидкостной системы охлаждения. Воздушное охлаждение в силу высокого теплового сопротивления воздуха имеет низкий КПД. Эффективность системы охлаждения зависит от охлаждающего вещества. В работе [12] проведено сравнение эксперимента с моделированием системы охлаждения камеры с помощью элемента Пельтье с двумя вариантами отвода тепла: создаваемый вентилятором воздушный поток или текущая через радиатор жидкость. При расходе жидкости порядка 20 мл/с обеспечивался отвод тепловой мощности до 230 Вт. Жидкостное охлаждение позволяло снизить температуру на 19°C по сравнению с пассивной системой охлаждения, а воздушное — на 10°C . Также показано, что с уменьшением размера камеры эффективность жидкостного охлаждения по сравнению с воздушным возрастает. Жидкостная система охлаждения более компактна, но требует наличия внешнего насоса для циркуляции жидкости с требуемыми параметрами.

Для охлаждения электронных устройств одним из требований для системы охлаждения является ее размер, а эффективность охлаждения зависит от конструктивных особенностей элементов активной зоны и физических свойств жидкости [13]. В микроканалах отвод тепла происходит за счет конвективного теплопереноса жидкостью и возрастает с увеличением скорости жидкости. В работе [14] в качестве системы жидкостного охлаждения испытаны три микротеплообменника с каналами шириной δW , составленными из длинных смещенных полос Т1 ($\delta W = 1.22$ мм), коротких смещенных полос Т2 ($\delta W = 1.22$ мм) и с каналами в виде шевронной структуры Т3 ($\delta W = 1.69$ мм). Проведено сравнение с традиционным теплообменником с прямыми каналами Т4 ($\delta W = 0.69$ мм). При размерах теплообменника 50×50 мм с расходом жидкости 230 мл/мин, тепловой мощностью нагревателя 40 Вт, температурой жидкости на входе 30°C максимальная температура составила 60°C для Т4, 51°C для Т1, 48°C для Т2 и 44°C для Т3.

В работе [15] показано, что нельзя пренебрегать как эффектами вязкой диссипации во входной области прямого канала, так и зависимостью вязкости от температуры по всей длине канала. В работе [16] показано, что температурная зависимость вязкости жидкости оказывает значительное влияние на величину расхода жидкости, особенно при малом значении перепада давления, приложенного к микроканалу.

Таким образом, для отвода тепловой мощности от элемента Пельтье требуется разработка жидкостной системы охлаждения с новой конструкцией комплектного миниатюрного насоса. Для обеспечения требуемых режимов работы микрозахвата необходима разработка соответствующих математических и компьютерных моделей, учитывающих специфику микрогидродинамики.

Известные типы микронасосов применяются во многих областях [17]: биологические системы и медицина (система доставки лекарств), системы охлаждения (прокачка хладагента через теплообменник), исследование космоса (высоковакуумные насосы), перекачивание жидкости с высокой скоростью (центробежные насосы с высоким числом Рейнольдса), перекачивание специальных жидкостей (электродинамические и магнетогидродинамические насосы). Производимые в настоящее время модели микронасосов трудно адаптировать для системы охлаждения микрозахвата, поскольку требуется микронасос не только с малым расходом, но и малых габаритов, с гибкой широкодиапазонной системой управления. Кроме того, разработанные для этих микронасосов теоретические модели также основаны на эмпирических данных, что не позволяет провести полную геометрическую оптимизацию конструкции и определить способы реализации оптимальных режимов работы. С другой стороны, генерация течения жидкости в упругом микроканале относится к области междисциплинарной физики, а именно, к взаимодействию жидкости и упругого тела [18]. Все это требует при разработке новых технических устройств построения новых математических моделей, связывающих гидродинамику, теорию упругости, процесс теплопереноса, параметрическую оптимизацию и теорию управления устройством.

Компьютерное моделирование течения жидкости в микроканалах, индуцированного внешним воздействием (перепадом давления, поступательным движением границы или деформацией канала), в последнее время активно развивается. Например, сотрудниками лаборатории РУТС разработаны компьютерные модели, которые могут быть использованы в качестве элемента вычислительного стенда для полунатурного моделирования сложных технических устройств широкого модельного ряда. Так, модель поршня для осциллирующего перепада давления, учитывающая пять параметров (амплитуда и частота перепада давления, трение поршня, жесткость пружины, отношение силы трения покоя и трения скольжения), была построена в работе [19] методами факторного вычислительного эксперимента 2-го порядка.

С развитием математических и компьютерных моделей появились пакеты численного моделирования, использующие метод конечных элементов (КЭ), которые позволяют проводить моделирование устройств с практически произвольной геометрией [20]. В работе [21] была построена осесимметричная компьютерная модель для взаимодействия ньютоновской жидкости с гиперэластичным несжимаемым телом и с применением моделирования методом КЭ проведен анализ устойчивости дифференциальных уравнений, записанных в вариационной форме в пакете численного моделирования FreeFem++ [22]. Разработана модель микронасоса, создающего течение жидкости (с расходом до 50 мкл/с) в плоском канале с погруженным в него пьезоэлементом с поперечным изгибом [23].

В работе [24] представлена методика построения элемента вычислительного стенда в виде аналитической формулы на основе трехмерного моделирования течения жидкости через эластичный микроканал, деформируемый пьезоэлементом по гармоническому закону, с вариантами использования полученных результатов в практических приложениях. Синтезирована компьютерная модель управления режимом течения жидкости, индуцированного приложенным вдоль канала перепадом давления, с учетом величины перепада давления и частоты сжатия трубки пьезоэлементом. Модель является частью жидкостной системы охлаждения микрозахвата.

В работе [25] предложена осесимметричная компьютерная модель пьезоэлектрического микронасоса, состоящего из эластичной трубки и системы круговых пьезоэлектрических элементов, а также проведен анализ режимов его работы. На границе пьезоэлементов с трубкой задаются граничные условия Дирихле. При несимметричном порядке колебаний пьезоэлементов от пьезоэлементов с одной стороны создается большее гидросопротивление [26–28], чем с другой, что приводит к генерации ненулевого среднего потока жидкости. Получены зависимости среднего расхода жидкости от времени, частоты колебаний пьезоэлементов и внутреннего диаметра трубки. В [29] на границе пьезоэлементов с трубкой задаются граничные условия Дирихле или Неймана, проводится параметрический анализ работы микронасоса и определяются режимы, при которых отсутствует обратное распространение тепла от микрозахвата к микронасосу. При малых частотах колебаний пьезоэлементов (меньше 1 кГц) модели имели высокую погрешность, что ограничивало область применения более высокими частотами.

В следующих разделах будут рассмотрены примеры приведенных выше моделей, акцент в описании работ и результатов сделан на специфичность подходов к моделированию, обусловленных не только размерным фактором, но и особенностями областей применения.

2. Влияние течения жидкости на движение поршня в трубе

В работе [30] исследуется осесимметричное течение жидкости с границей, перпендикулярной течению (рис. 1). Аналитически выведены уравнения для радиальной и осевой компонент скорости и давления течения жидкости в трубе конечной длины с подвижной правой границей, а также определены граничные условия на подвижной границе. Получено численное решение задачи на конечно-разностной сетке итерационным методом Ньютона–Рафсона [31] для различных скоростей движения границы. Полученное распределение скоростей и давления можно использовать в качестве начального приближения вблизи оси для численной схемы расчета течения топлива в трубе с подвижным поршнем в гидромеханических исполнительных механизмах, а также для оценки изменения давления, вызываемого течением жидкости вблизи подвижной границы поршня.

Исследование влияния трения между внутренними частями технических элементов на характер движения элементов является актуальной задачей, так как позволяет определить параметры, при которых трение будет минимальным, а коэффициент полезного действия максимальным. С точки зрения трибологии различают различные виды трения, прежде всего *сухое* и *вязкое* трение. В первом приближении коэффициент сухого трения λ является коэффициентом пропорциональности

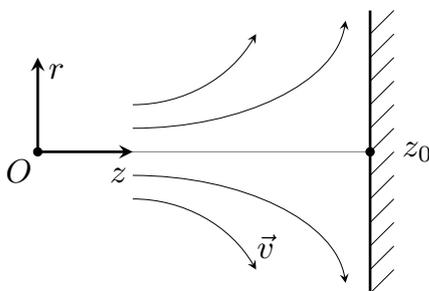


Рис. 1. Осесимметричное течение жидкости с границей, перпендикулярной течению, вблизи оси трубы конечной длины. Течение направлено вдоль оси Oz , труба ограничена плоскостями $z = 0$ и $z = z_0$ (подвижная граница)

между силой трения F_f и силой нормальной реакции N_n (закон Амонтона–Кулона [32]). Сила вязкого трения проявляется при движении твердого тела по поверхности жидкости и определяется напряжением, создаваемым жидкостью на поверхности твердого тела. Величина силы вязкого трения F_v ньютоновской жидкости пропорциональна площади контакта и градиенту скорости в направлении, перпендикулярном движению (закон Ньютона). Коэффициентом пропорциональности является величина динамической вязкости жидкости μ [33]. Таким образом, для определения силы вязкого трения, действующей на твердую поверхность, необходимо решить гидродинамическую задачу движения жидкости. В работе [34] показано движение поршня радиуса r_1 и массой m внутри цилиндра радиуса $r_2 = r_1 + h$ (h — зазор между поршнем и цилиндром), заполненного жидкостью с плотностью ρ и динамической вязкостью μ , под действием периодического по времени перепада давления $\Delta p f(t)$, $f(t) = \cos(\omega t)$ (рис. 2). Уравнения движения поршня (второй закон Ньютона) и гидродинамики (Навье–Стокса) с условиями залипания на границе цилиндра и поршня записывались с помощью метода конечных разностей и решались численно методом Ньютона. Было получено, что сила, действующая со стороны жидкости на поршень может приводить как к ускорению, так и к замедлению (вязкое трение) скорости поршня. Наличие сухого трения смещает положение равновесия и сдвиг по фазе относительно фазы градиента давления.

В работе [35] продолжено исследование влияния различных видов сил трения на движение поршня в цилиндрической трубе с учетом дополнительного действия жесткости пружины, а также определяются условия, когда кривизной трубы можно пренебречь и свести гидродинамическую задачу к плоскому параллельному течению жидкости с комбинированным паузейлевским и сдвиговым (с одной фиксированной и одной инертной границей) воздействиями. Совместное воздей-

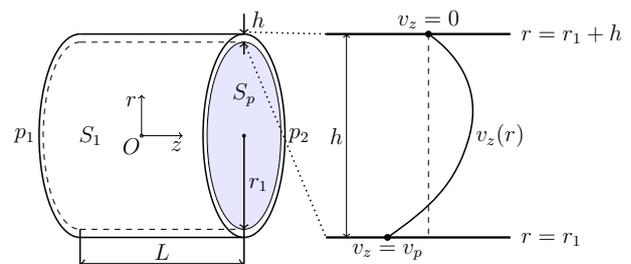


Рис. 2. Схема течения жидкости в зазоре между двумя коаксиальными цилиндрами

ствие жесткости пружины и сухого трения приводит к тому, что точка равновесия определяется наличием жесткости пружины ($z_p = 0$), а период колебаний — наличием силы сухого трения (колебания происходят на частоте перепада давления, а не на собственной частоте). С ростом как жесткости пружины, так и силы сухого трения амплитуда колебаний поршня уменьшается. Для малых сил трения (как сухого, так и вязкого) выход на периодический режим движения происходит за большое количество циклов. В системе с пружиной влияние вязкого трения значительно. При больших перепадах давления кривизной трубы можно пренебречь и свести задачу к нестационарному параллельному течению в плоском капилляре.

В работе [36] рассматривается техническое устройство, состоящее из двух коаксиальных цилиндров, где внешний цилиндр неподвижен, а внутренний движется под действием перепада давления, приложенного к его торцам. Исследуется влияние на движение внутреннего цилиндра двух видов трения — сухого трения, возникающего при взаимодействии стенок цилиндров, и вязкого трения, возникающего при течении вязкой жидкости в зазоре между цилиндрами. Показана необходимость учета различия в значениях максимальной силы трения покоя и силы трения скольжения. Определено, что сила вязкого трения оказывает небольшое влияние на динамику движения внутреннего цилиндра, а режим течения в зазоре сильно зависит от ширины самого зазора. Проведена оценка динамических свойств технического устройства как элемента системы управления. На рис. 3 показана зависимость скорости поршня v_p для различных значений силы сухого трения F_f .

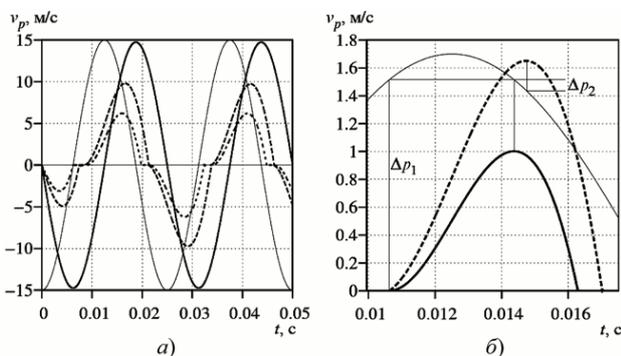


Рис. 3. Скорость внутреннего цилиндра v_p от времени t : (а) при отсутствии (—) и наличии сухого трения $F_f = 4$ Н (---) и $F_f = 5$ Н (· · ·); (б) при сухом трении $F_f = 7$ Н: (—) $n_f = 1$; (---) $n_f = 0.95$. Форма управляющего сигнала (—)

Видно, что даже незначительное изменение силы трения покоя $F_g = n_f F_f$, где n_f — безразмерный коэффициент, может привести к значительному изменению скорости (на рис. 3(б) уменьшение n_f на 5 % увеличивает максимальную скорость на 65 %).

3. Элементы агрегата дозирования топлива

Практический опыт эксплуатации систем управления газотурбинным двигателем (ГТД) показал необходимость исследования динамических характеристик устройства дозирования топлива с учетом распределения его по контурам топливного коллектора до поступления в камеру сгорания. В работе [37] представлена нелинейная математическая модель функционирования агрегата дозирования топлива, учитывающая работу распределительного клапана, который включает в себя два поршня и три топливных контура. Предложена методика определения начальных условий для системы обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающей перемещения сервопоршня и поршня клапана постоянного перепада давлений. В работе [38] численно исследуется движение поршня в цилиндрической трубе с учетом сухого и вязкого трений и упругости пружины. Определены факторы процесса для моделей с сухим и вязким трением. Предложена схема проведения полного факторного вычислительного эксперимента [39], где в качестве целевых функций выбран расход топлива в единицу времени и расход топлива за период установившегося течения.

В работе [40] обосновывается необходимость использования уравнений Навье–Стокса [41] для расчета характеристик элементов исполнительных механизмов. Для этого проводится численное моделирование (в программе Elmer FEM) течения жидкости в канале круглого сечения и определяют расход жидкости и максимальная скорость течения жидкости в зависимости от перепада давления, приложенного к входу и выходу канала. Показана зависимость порогового перепада давления и расхода топлива от температуры с учетом изменения вязкости и плотности топлива. Сравняются результаты, полученные двумя методами расчета: на базе уравнения Бернулли, на котором основаны инженерные расчетные методики, и на базе уравнений Навье–Стокса, учитывающих вязкость жидкости. Показано, что для адекватного учета динамических характеристик в элементах исполнительных механизмов необходимо использовать математические модели течения жидкости (топлива), основанные на уравнениях Навье–Стокса.

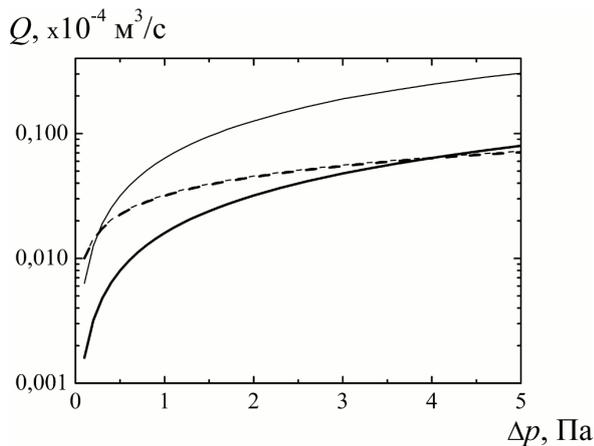


Рис. 4. Зависимость расхода топлива от перепада давления по уравнениям Навье–Стокса (сплошная линия) и Бернулли (штриховая линия) при температуре топлива 20°C (тонкие линии) и -20°C (толстые линии)

Это связано с тем, что данные уравнения учитывают вязкость жидкости, которая значительно меняется при изменении температуры топлива, в то время как в уравнение Бернулли [42], на базе которых основаны все инженерные методы расчета, не входят параметры, существенно влияющие на динамику течения жидкости. Различия в результатах моделирования зависимости расхода жидкости от перепада давления для разных температур показаны на рис. 4.

В работе [43] проводится сравнение существующих методов моделирования элементов топливной автоматики. Предлагается новый подход, позволяющий оценить влияние конструктивных факторов элемента на его динамические свойства уже как элемента системы автоматического управления ГТД. Суть метода в том, что принципиальная (конструкторская) схема заменяется ориентированным графом, то есть сохраняется связь между реальной конструкцией и математическим описанием. В этом случае математическая модель агрегата дозирования топлива (АДТ) описывается тремя подсистемами уравнений:

- первая подсистема уравнений — это система дифференциальных уравнений, отражающая закон изменения координаты положения подвижных элементов (поршней, причем не одного, а всех) АДТ во времени;
- вторая подсистема уравнений описывает взаимосвязь потоков в узлах и контурах сети. Ее решение позволяет определить величины внутренних потоков (расходов топлива) в системе;

- третья подсистема уравнений составляется по зависимости величины расхода жидкости от перепада давления на каждой из внутренних дуг. Решение данной подсистемы уравнений позволяет определить давления в узлах сети.

Дополнительно учитывается влияние силы трения на движение поршня. На рис. 5 показано влияние сухого трения на динамику движения поршня с пружиной жесткостью k_p (геометрия и обозначения представлены на рис. 6). С ростом силы сухого трения амплитуда и скорость движения поршня уменьшаются, также уменьшается количество периодов установления периодического движения. Отметим, что в промежутки периода, когда величина силы сухого трения F_0 выше силы, создаваемой жидкостью $S_p(p_1 - p_2)$, поршень останавливается, и, следовательно, на какой-то момент времени происходит потеря управляемости элементом.

В работе [19] исследуются режимы работы основного элемента топливной автоматики — сервопоршня дозирующей иглы. Рассматривается движение поршня длиной L , радиуса R и массой m_p внутри трубы круглого сечения бесконечной длины, заполненной жидкостью (рис. 6). Система приводится в движение за счет перепада давления $\Delta p \cdot \cos(\omega t)$, $\omega = 2\pi f$, где f — частота колебаний перепада давления; $\Delta p = (p_1 - p_2)$ — амплитуда перепада давления; p_1 и p_2 — значения давлений слева и справа от поршня соответственно.

Построены математическая и компьютерная модели сервопоршня. Выбраны факторы вычислительного эксперимента и функции отклика. Предложена аппроксимация функций отклика в виде полинома с линейными, парными и квадратичными вкладками факторов. Определены существенные факторы динамики поршня и их взаимодействия,

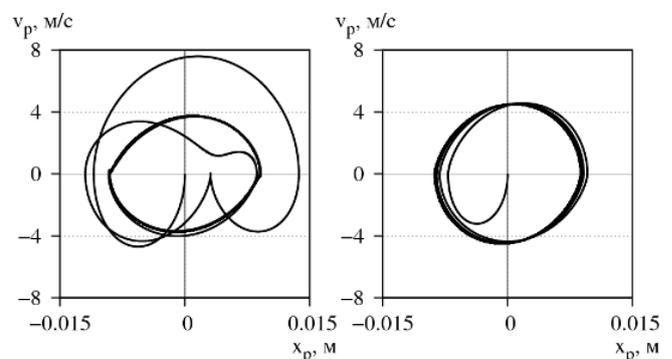


Рис. 5. Фазовая диаграмма движения поршня при $k_p = 1000 \text{ Н/м}$, $F_0 = 1 \text{ Н}$ (слева), $F_0 = 3 \text{ Н}$ (справа)

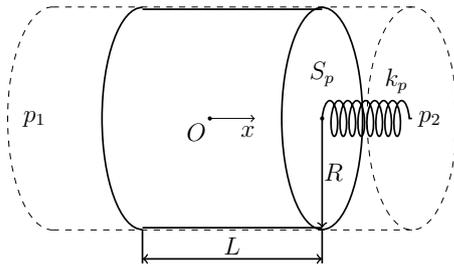


Рис. 6. Геометрия задачи. Поршень — сплошная линия; элемент трубы — штриховая линия

а также погрешность аппроксимации. Установлены температурные зависимости параметров, что позволяет провести адекватное моделирование работы элемента с учетом динамических изменений в этом элементе в процессе работы. Показан способ объединения отдельных элементов вычислительного стенда в систему.

Показано, что за конечное количество периодов (от 5 до 13) перепада давления устанавливается периодический и симметричный отклик системы (перемещение поршня). Форма отклика в области больших давлений имеет вид ступеньки, с уменьшением величины силы трения скольжения форма становится более гармонической (близкой к форме перепада давления). На динамику движения поршня наибольшее влияние оказывают упругость пружины, амплитуда перепада давления с положительной связью и частота перепада давления с отрицательной связью. На сдвиг фазы перемещения поршня относительно перепада давления влияют амплитуда перепада давления, сила трения и отношение сил трения.

Представлены способ построения управляющего сигнала для связанного элемента стенда по функциям отклика; схема расчета скорости нагрева из-за работы силы трения (порядка 0.25 градусов в секунду); дополнительная величина силы трения (порядка 1 ньютон), возникающая за счет теплового расширения; влияние нагрева на изменение жесткости пружины.

В работе была предложена схема элемента вычислительного стенда сервопоршня, связывающая управляющий сигнал (форма внешнего перепада давления) с функциями отклика (динамика перемещения поршня) и учитывающая изменение параметров под действием температуры (изменение силы трения поршня и упругости пружины в результате нагрева) в ходе эксплуатации элемента. Главным преимуществом данного подхода является замена полного моделирования (требующего больших вычислительных ресурсов) аппроксимацией, позволяющей проводить расчеты функций отклика в реальном времени.

4. Компьютерное моделирование поршня с антикавитационным покрытием

Одним из важнейших направлений развития нанотехнологий является возможность создания разнообразных материалов с принципиально новыми свойствами. Применение нанотехнологий дает дополнительные преимущества, связанные как просто со снижением общего веса технического устройства, так и с переходом к более совершенным конструкциям различных устройств, например, топливных агрегатов. В работе [44] представлено исследование возможности получения наноструктурированного алюминиевого сплава и изготовления из него одного из элементов топливного агрегата — устройства дозирования топлива и доказана возможность такого получения. В дальнейшем предполагается исследовать сплав 6061 как менее легированный и невосприимчивый к коррозии.

Кавитационному разрушению подвержены практически все известные конструкционные материалы, причем данное разрушение деталей начинается с тонких поверхностных слоев [45]. Поэтому задача определения оптимального материала для изготовления поверхности подвижного элемента для повышения ее износостойкости, термической и механической прочности, а также стойкости к кавитационному разрушению, является важной. Решение данной задачи позволит в дальнейшем обеспечить безопасность устройства дозирования топлива и долгосрочность его работы. Так, например, в работе [46] было предложено выполнение поршня из алюминиевого сплава, содержащего упрочненную интенсивной пластической деформацией головку с ультрамелкозернистой структурой материала, торец которой обработан лазером для уменьшения вероятности появления кавитации в ходе работы поршня. Анализ возможности применения антикавитационного покрытия для поршня представлен в работе [47].

Рассматривается задача определения оптимального материала для изготовления поверхности подвижного элемента (поршня), который обладает повышенной стойкостью к кавитационному разрушению, с целью обоснования целесообразности применения конструкционных материалов для изготовления поршней в элементах топливной автоматики. На основе трехмерного численного моделирования уравнений упругости [48] исследуются условия, при которых кавитационное схлопывание пузырька на поверхности поршня, изготовленной из различных конструкционных материалов, может привести к

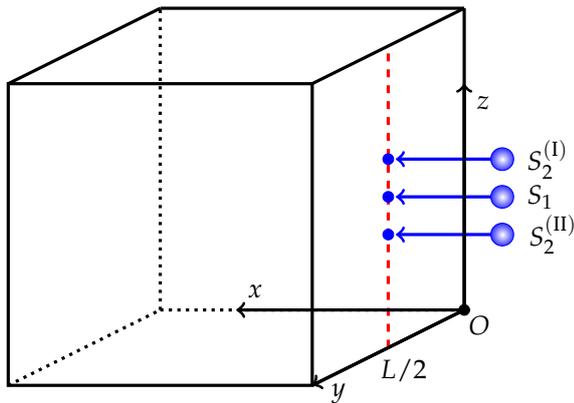


Рис. 7. Геометрия модели в декартовой системе координат: S_1 – для случая одиночного пузырька; $S_2^{(I)}$ и $S_2^{(II)}$ – для случая пары пузырьков

необратимым деформациям поршня. Давление, действующее на поршень, определялось из модели схлопывания несферического пузырька с образованием кумулятивной струйки. Изучено влияние на поверхность схлопывания как одиночного пузырька, так и пары пузырьков, расположенных на различном расстоянии друг от друга. Геометрия модели представлена на рис. 7.

На рис. 8(а) показаны профили деформации для одиночного пузырька и двух пузырьков, схлопывающихся на различных расстояниях друг от друга. Возможность кавитационного разрушения поршня за счет превышения предела текучести при схлопывании пузырьков показана на рис. 8(б). Видно, что парное схлопывание пузырьков увеличивает эффективное напряжение в области воздействия на $\approx 15\%$. Максимум напряжений представляет собой круг с двойным диаметром одиночного пузырька; для пары пузырьков напряжения распределяются в виде суперпозиции двух окружностей с двойным диаметром пузырька и центрами в центрах схлопывающихся пузырьков.

Расчеты показали, что при специальной обработке поверхность поршня станет более устойчивой к эрозионному разрушению; деформации локализованы вблизи области, к которой приложена сила, на расстоянии порядка двух диаметров пузырька; кавитационное разрушение материала связано с порогом текучести и размером зерен, не зависит от модуля Юнга и обратно пропорционально коэффициенту Пуассона; одновременное схлопывание двух пузырьков на расстоянии порядка одного–двух размеров пузырька увеличивает максимальное давление на поверхность и, следовательно, увеличивает вероятность необратимой деформации поверхности.

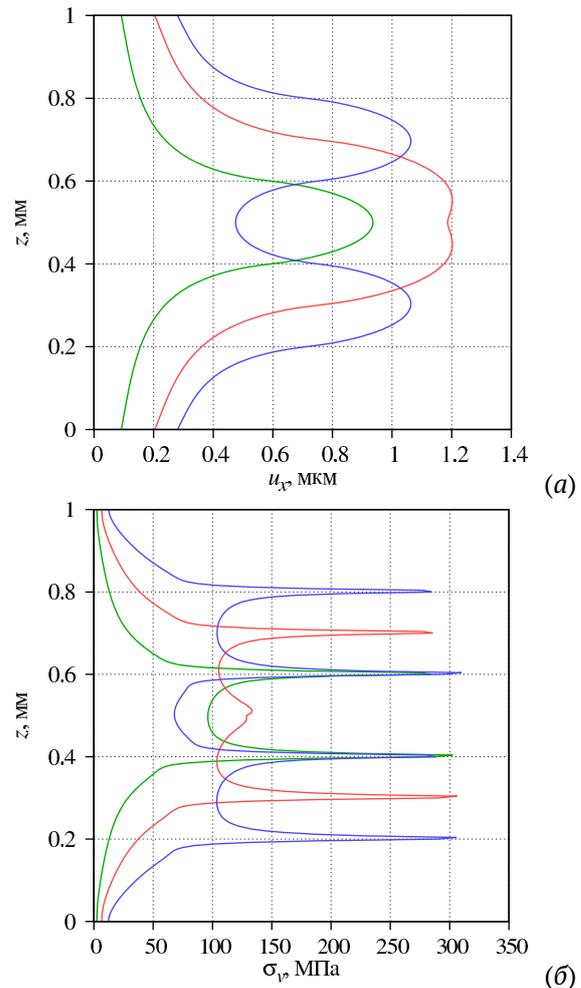


Рис. 8. Перемещение u_x (а) и эквивалентные напряжения σ_v (б) вдоль оси Oz ($y = L/2$) для одиночного пузырька с $z = L/2$ (зеленая линия); двух пузырьков с $z = L/2 - 2R_b$ и $z = L/2 + 2R_b$ (красная линия); двух пузырьков с $z = L/2 - 4R_b$ и $z = L/2 + 4R_b$ (синяя линия)

Следует отметить, что в данной работе проведена оценка возможности наступления пластических деформаций (достижения предела текучести), а сами пластические деформации не рассматривались. Как показано в работе [49] после достижения предела текучести при рассмотрении пластических деформаций от времени на поведение системы величина модуля Юнга будет иметь влияние.

5. Компьютерное моделирование течения жидкости через гидросопротивление

В работе [26] разработана компьютерная модель жиклера как элемента вычислительного стенда. Для этого была изучена динамика течения жид-

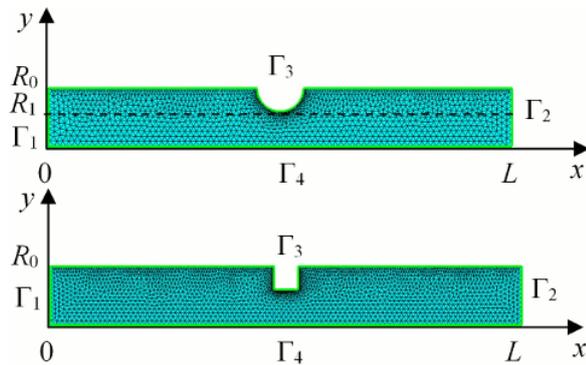


Рис. 9. Геометрия и сетка канала для цилиндрического (сверху) и острокромочного (снизу) жиклеров

кости через цилиндрическую трубу с жиклерами разных радиусов при различных значениях перепада давления на основе решения уравнений Навье–Стокса методом конечных элементов в открытом инженерном пакете Elmer FEM. Получено правило перевода перепада давления (входного параметра) в расход топлива (функцию отклика) с помощью интерполяционных формул. Проведено сравнение результатов моделирования течения через цилиндрический и острокромочный жиклеры (рис. 9).

На рис. 10 показана зависимость расхода жидкости Q от перепада давления Δp в трубе и цилиндрическом жиклере для различной ширины проходного отверстия R_1 . Видно, что в области низкого перепада давления $Q \sim \Delta p$, а в области высокого перепада давления $Q \sim \Delta p^{1/2}$. В промежуточной области $1^{-1} < \Delta p < 10^3$ Па можно построить аппроксимацию $Q(\Delta p, R_1)$ по данным численного моделирования. Численные расчеты динамики жидкости в цилиндрическом и острокромочном жиклерах показали, что при проектировании технических систем желательно использовать цилиндрические жиклеры, поскольку они повышают статическую точность элемента. С помощью гидродинамического критерия подобия был проведен анализ областей применимости полученных результатов, который позволяет сделать вывод, что результаты могут быть применены как к устройствам топливной автоматики (сантиметровый и метровый масштабы), так и к микроэлектромеханическим устройствам (микронный масштаб).

В работе [16] исследуется стационарное течение технической жидкости, индуцированное перепадом давления, в канале с цилиндрическим жиклером для всей рабочей области температур. Уравнения Навье–Стокса решаются численно в осесимметричной геометрии методом конечных элементов. Получены температурные зависимости ма-

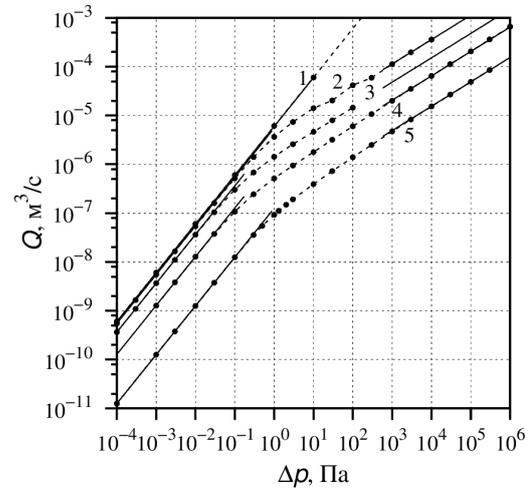


Рис. 10. Расход топлива Q в зависимости от разности давлений Δp : в трубе (линия 1) и в цилиндрическом жиклере для $R_1 = 4$ мм (линия 2), $R_1 = 3$ мм (линия 3), $R_1 = 2$ мм (линия 4) и $R_1 = 1$ мм (линия 5). Сплошная линия – асимптотическое решение; пунктирные – аппроксимация; символы – результат численного моделирования

териальных параметров ряда жидкостей, наиболее используемых в технических устройствах. Построена модель цилиндрического жиклера в виде элемента вычислительного стенда, учитывающая перепад давления, радиус проходного отверстия жиклера и температуру жидкости для областей с малым и большим перепадами давления.

На рис. 11 показана зависимость расхода жидкости от перепада давления для температур $T = \{-40^\circ, 0^\circ, 40^\circ, 160^\circ\}$ C. В области малых перепадов давления Δp расход жидкости Q увеличивается с ростом температуры T и пропорционален Δp (сплошные линии на рис. 11). Размер данной области зависит от T , поскольку при малых Δp число Рейнольдса Re , характеризующее течение, мало и обратно пропорционально кинематической вязкости $\nu(T) = \mu(T)/\rho(T)$. Так, например, для $T = 160^\circ$ C имеем область $\Delta p < 10^{-3}$ Па, а для $T = -40^\circ$ C – $\Delta p < 1$ Па. В области высоких перепадов давления Δp зависимость расхода жидкости Q от температуры слабо выражена и Q пропорционален корню от Δp (пунктирная линия на рис. 11). Данная область также зависит от температуры T , но в меньшей степени, чем в случае малых Δp .

Полученные результаты дополняют модель [26] и позволяют построить аналитическую модель в виде элемента вычислительного стенда стационарного течения жидкости в цилиндрическом жиклере, которая учитывает перепад

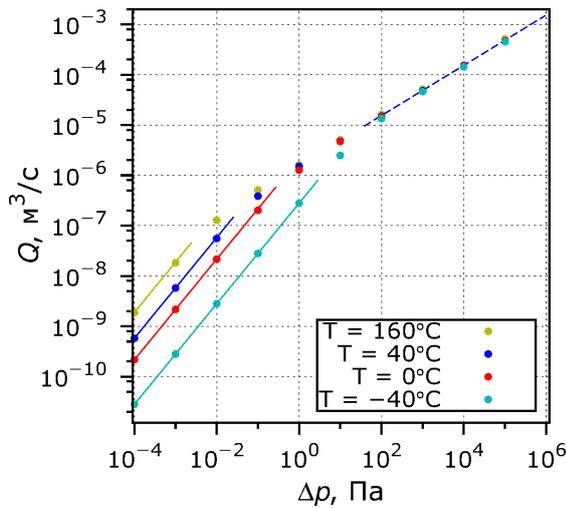


Рис. 11. Расход жидкости в зависимости от перепада давления для различных температур при $R_1 = 2$ мм. Символы – численный расчет; сплошные линии – аппроксимация для малых давлений; пунктирная линия – аппроксимация для больших давлений

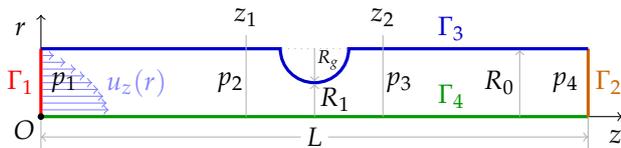


Рис. 12. Осесимметричная геометрия системы труба–гидросопротивление–труба. Oz – ось симметрии; z_1z_2 – гидросопротивление

давления, радиус проходного отверстия жиклера и температуру жидкости. Обобщенная модель обладает высокой точностью (относительная погрешность не более 10^{-5} % для малых перепадов давления и не более 1 % для больших) по четырем численным расчетам для малых Δp и трем для больших Δp .

В работе [27] исследуется стационарное течение через систему элементов труба–гидросопротивление–труба для определения зависимости расхода жидкости от приложенного к системе перепада давления и геометрии системы (рис. 12). Уравнения Навье–Стокса решались численно в осесимметричной геометрии методом конечных элементов на неравномерной расчетной сетке.

Получено, что область нелинейного падения давления в системе элементов локализована на длине трех радиусов входного отверстия, что позволило построить модель системы произвольной длины с фиксированной длиной гидросопротив-

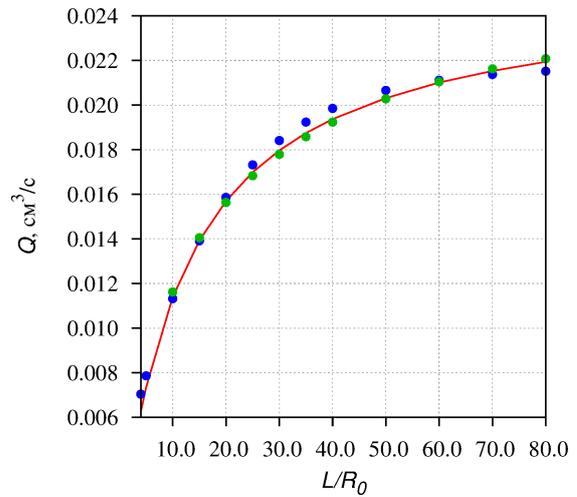


Рис. 13. Зависимость расхода жидкости Q от нормированной длины системы элементов L/R_0 : сплошная линия – численный расчет, синие круги – аппроксимация N1; зеленые круги – аппроксимация N2

ления. Построен эквивалент трубы для системы элементов с гидросопротивлением. На рис. 13 показана зависимость расхода жидкости Q от нормированной длины системы элементов L/R_0 для полного численного моделирования (сплошная линия) и по приближенным аналитическим формулам (модифицированная формула Хагена–Пуазейля с зависимостью от радиуса проходного отверстия N1 и формула для трубы с длиной, равной длине смежных элементов, и перепадом давления, уменьшенным на перепад давления в гидросопротивлении N2). Видно, что аппроксимация хорошо согласуется с полным численным моделированием. Данное исследование особенно актуально для гидроэлементов микроэлектромеханических систем, поскольку позволяет провести оптимизацию геометрии системы элементов для получения необходимых рабочих параметров технического устройства.

6. Течение жидкости в канале с динамически изменяемой геометрией

В работе [28] изучается течение жидкости в плоском канале с гидросопротивлением для двух случаев динамического изменения геометрии канала: поперечное сжатие проходного отверстия гидросопротивления (течение вызывается приложенным к слою перепадом давления) и продольное движение гидросопротивления вдоль канала (течение вызывается этим движением). В процессе моделирования использовалась неравномерная адаптивная расчетная сетка (рис. 14 и 15).

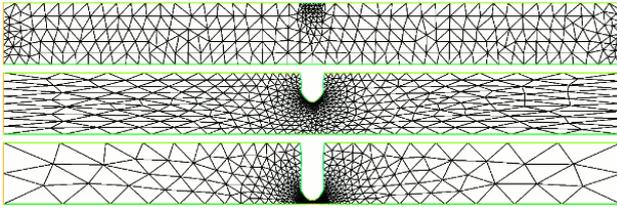


Рис. 14. Адаптивная расчетная сетка в различные моменты времени при стационарном поперечном сжатии границы

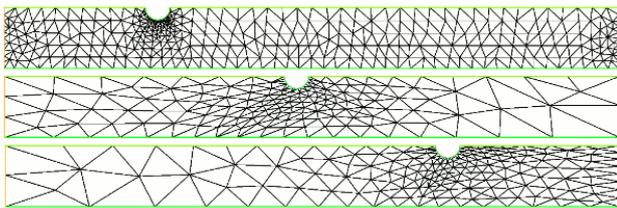


Рис. 15. Адаптивная расчетная сетка в различные моменты времени при стационарном продольном движении границы

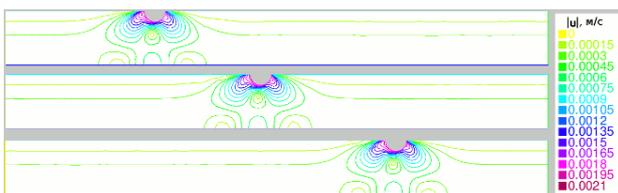


Рис. 16. Изолинии модуля скорости $|u|$ в различные моменты времени при стационарном продольном движении границы

Получено, что в геометрии с поперечным сжатием гидросопротивления течение является ламинарным без образования вихрей. При продольном перемещении гидросопротивления расход жидкости остается постоянным с образованием устойчивых вихрей (рис. 16), перемещающихся вдоль канала со скоростью движения гидросопротивления. Поскольку профиль скорости в широком диапазоне параметров системы остается параболическим, была предложена аналитическая формула расхода жидкости, который зависит от ширины отверстия нелинейно (в обеих геометриях канала). На основе результатов моделирования построена аналитическая модель, учитывающая расход жидкости от ширины проходного отверстия гидросопротивления, которая содержит четыре интерполяционных параметра (рассчитываемых по четырем точкам из одного моделирования полной модели). Полученную модель можно использовать в качестве элемента вычислительного стенда для определения расхода жидкости в рассматриваемой системе.

Моделирование динамического изменения геометрии открывает большие возможности при разработке новых технических устройств. Например, продольное движение гидросопротивления можно использовать для создания течения в канале с постоянным давлением, а поперечное сжатие — для регулирования расхода жидкости в канале с ненулевым перепадом давления.

В работе [50] исследуется трехмерная компьютерная модель различных режимов течения жидкости через канал, деформируемый пьезоэлементом. Рассматривается влияние двух видов деформаций трубки на форму ее внутренней поверхности, которая, в свою очередь, определяет геометрию канала, по которому течет жидкость, а именно, деформаций, описываемых граничными условиями Дирихле и Неймана на поверхности контакта трубки и пьезоэлемента. Изучаются два режима течения жидкости в микроканале: один конец канала закрыт и течение происходит за счет деформации трубки, режим позволяет провести тестирование компьютерной модели; оба конца канала открыты и течение происходит как за счет деформации трубки, так и за счет приложенного к слою перепада давления. Геометрия модели представлена на рис. 17.

Получены следующие результаты: расход жидкости зависит от частоты сжатия пьезоэлемента и при отсутствии перепада давления не зависит от физических параметров жидкости. Это теоретически дает возможность реализации гидравлического микропривода с линейной «механической» (расходной) характеристикой; под действием перепада давления к периодической составляющей расхода жидкости добавляется постоянная составляющая обратно пропорциональная вязкости жидкости; подбором параметров (частота, перепад давления) можно получить режим, соответствующий выдавливанию каплей. С ростом частоты объем выдавливаемой за период капли уменьшается.

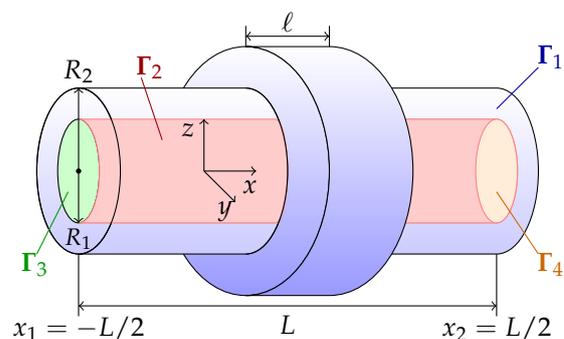


Рис. 17. Геометрия и основные обозначения модели сжатия трубки пьезоэлементом

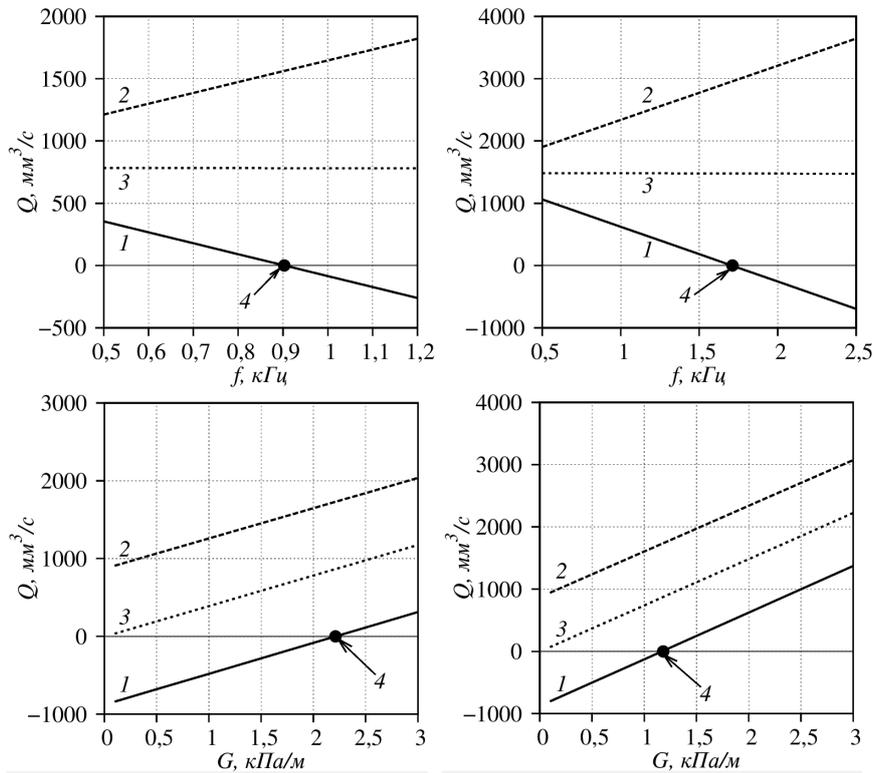


Рис. 18. Зависимости расходов жидкости (слева – вода; справа – уайт-спирит), протекающей через правую границу, от частоты пьезоэлемента f при постоянном градиенте давления $G = 2$ кПа/м (сверху) или от градиента давления $G = 2$ кПа/м при постоянной частоте $f = 1$ кГц (снизу). Линии: 1 – минимальный расход Q_{min} ; 2 – максимальный расход Q_{max} ; 3 – средний расход Q_a ; 4 – пограничный режим $Q_{min} = 0$

В работе [24] на основе численного моделирования течения жидкости через упругую трубку, деформируемую пьезоэлементом, построены аналитические модели управления расходом жидкости за счет частоты колебаний пьезоэлемента или изменения приложенного с слою градиента давления (рис. 18). Показаны варианты использования полученных результатов в практических приложениях. Например, в системе жидкостного охлаждения полученное соотношение между параметрами системы позволяет определить режим течения, предотвращающий втекание нагретой жидкости через выходное отверстие канала. Результаты планируется использовать при разработке вычислительного стенда капиллярного микрозахвата, содержащего две трубки (на входе и выходе) с пьезоэлементами, с разделом устройства на две части – с динамически изменяемой и неизменной геометриями, – что значительно упростит полное численное моделирование.

7. Пьезоэлектрический микронасос

В работе [23] предлагается двумерная компьютерная модель течения жидкости в плоском канале

под действием приложенного перепада давления с погруженным в него плоским керамическим пьезоэлектрическим приводом, изгибающимся в поперечном направлении пропорционально приложенному электрическому напряжению U (рис. 19).

Предложена математическая модель связанной системы жидкость–пьезопривод в вариационной форме для численного моделирования методом конечных элементов. Поскольку задание граничных условий Дирихле на перемещение в данной задаче затруднительно, была построена эквивалентная схема деформаций пьезопривода с использованием граничных условий Неймана. Рассчитаны деформации и эквивалентные напряжения фон Мизеса на пьезоприводе. Проведен анализ влияния геометрии канала и образуемого пьезоприводом гидродинамического сопротивления на динамику течения жидкости. Предложен алгоритм адаптивного динамического перестроения расчетной сетки канала при деформациях, превышающих размер конечных элементов. При симметричном управляющем сигнале, подаваемом на пьезопривод, асимметрия геометрии приводит к нарушению симметрии расхода жидкости в пределах пе-

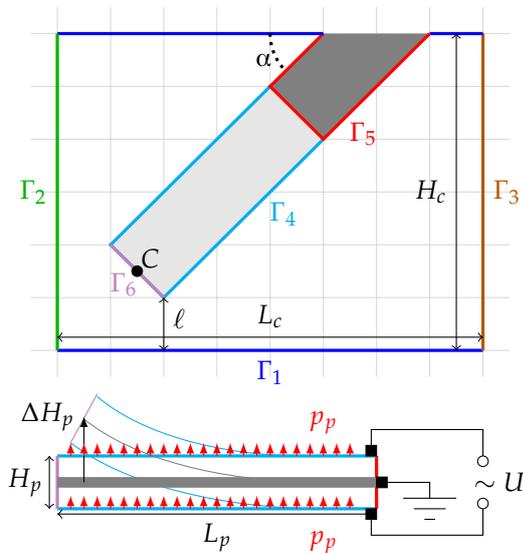


Рис. 19. Геометрия модели. Канал: стенка Γ_1 , входное Γ_2 и выходное Γ_3 отверстия. Пьезопривод: зафиксированная Γ_5 и гибкая Γ_4 части

риода как по величине расхода жидкости, так и по времени. В отсутствии перепада давления при низких частотах колебаний пьезоэлемента (порядка обратного времени релаксации скорости) средний по периоду расход жидкости отличен от нуля и растет с увеличением частоты. При наличии перепада давления между входным и выходным отверстиями канала средний расход жидкости пропорционален перепаду давления; на низких частотах — обратно пропорционален частоте; с ростом частоты — выходит на насыщение. На основе результатов численного моделирования предложены различные варианты новых микрогидродинамических технических устройств, генерирующих течение жидкости с помощью пьезоэлектрического привода с поперечным изгибом: микронасос, создающий течение в замкнутом контуре; регулятор расхода жидкости и дозатор объема жидкости.

В работе [25] моделируется работа пьезоэлектрического микронасоса, состоящего из упругой эластичной микротрубки (материал — силиконовая резина) круглого сечения и размещенной на ней системы из кольцевых керамических пьезоэлементов (число пьезоэлементов — один, три или пять). Геометрия устройства представлена на рис. 20.

Пьезоэлементы формируют поток рабочей жидкости путем радиального сжатия. Численно исследуются два режима работы данного устройства. В первом режиме работы к микроканалу приложен перепад давления, и колебания пьезоэлемента ре-

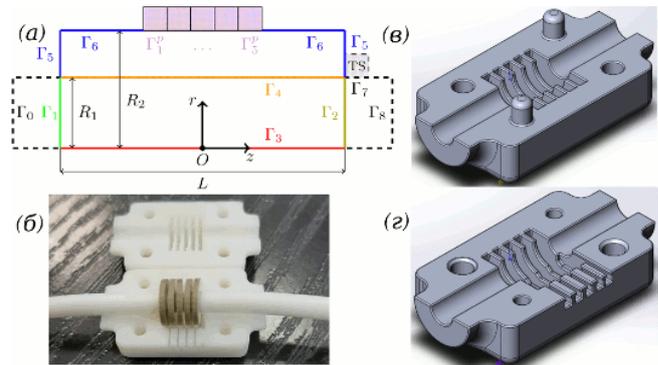


Рис. 20. Геометрия модели (а); прототип микронасоса (б); верхняя (в) и нижняя (г) части корпуса микронасоса

гулируют расход протекающей жидкости. Данный режим можно использовать для модуляции расхода жидкости. Во втором режиме течение создается колебаниями пьезоэлементов по определенным схемам: при симметричной схеме (один пьезоэлемент или симметричное сжатие нескольких элементов) средний по времени расход жидкости равен нулю; при несимметричной схеме (часть пьезоэлементов формирует гидросопротивление, а другие создают несимметричное из-за гидросопротивления течение) возможна генерация отличного от нуля среднего по времени течения в положительном направлении (рис. 21). Моделирование проводилось на неравномерной адаптивной расчетной сетки решением уравнений Навье–Коши [51] и Навье–Стокса [41] в осесимметричной геометрии. Данный режим позволит использовать устройство в качестве пьезоэлектрического микронасоса, имеющего малый размер и позволяющего перекачивать небольшие объемы жидкости.

По результатам численного моделирования получены следующие результаты. Для создания течения жидкости необходимо задавать асимметричный режим работы пьезоэлементов. При выборе схемы колебания системы пьезоэлементов, в которой сначала происходит одновременное сжатие всех пьезоэлементов, а затем пьезоэлементы по одному последовательно (от левого к правому) разжимаются, получается, что первоначальное сжатие всех пьезоэлементов симметрично «выталкивает» жидкость из трубки и формирует гидросопротивление. При последующем растяжении пьезоэлемент создает асимметричное «всасывание» жидкости, т.к. гидросопротивление находится только с правой стороны. За время отработки всей схемы в положительном направлении протекает больше жидкости, чем в обратном, т.е. средний расход жидкости положительный. Со временем средний расход

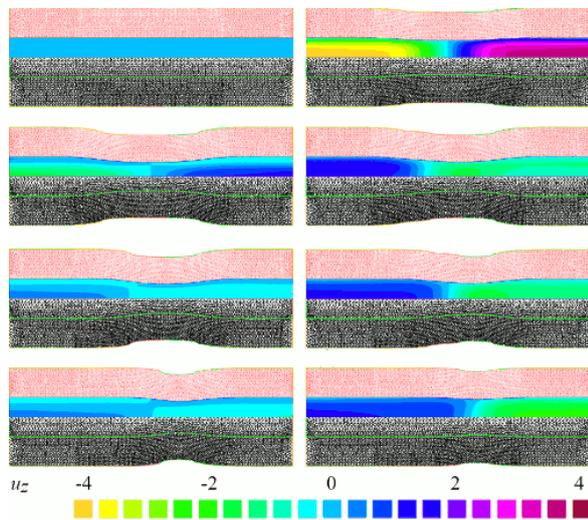


Рис. 21. Этапы деформации канала системой из трех пьезоэлементов

жидкости увеличивается до тех пор, пока система не выйдет на насыщение (рабочий режим). С ростом частоты колебаний пьезоэлементов и с увеличением их количества средний прокачиваемый объем жидкости увеличивается, а с уменьшением радиуса канала — уменьшается. В пределах рабочих параметров устройства, при которых частота колебаний пьезоэлементов составляет несколько кГц, за время выхода на рабочий режим порядка 1 с микронасос длиной 10 мм и радиуса 5 мм с пятью пьезоэлементами создает течение со средним расходом жидкости несколько нл/с.

На основе результатов численных расчетов получена приближенная аналитическая формула, связывающая основные параметры рабочего режима (время выхода на рабочий режим и средний расход жидкости) с параметрами системы (количество и частота колебаний пьезоэлементов, радиус микроканала). Данная формула позволяет построить элемент вычислительного стенда для оценки режимов работы рассматриваемого устройства, а также управлять самим устройством в реальном времени.

В [52] проведена серия вычислительных экспериментов для различного количества пьезоэлементов и набора значений для плотности расчетной сетки и определена величина систематической погрешности моделирования. Предложен способ компенсации систематической погрешности с помощью дополнительного приложения к каналу перепада давления. Данный способ позволил снизить погрешность на два порядка. Представленный в работе подход к снижению систематической погрешности позволит по-

высить точность моделирования режимов работы пьезоэлектрического микронасоса.

В расширенной модели [29] проводится сравнение режимов работы микронасоса для граничных условий Неймана (ГУН) и граничных условий Дирихле (ГУД). ГУН означают «мягкий» пьезоэлемент, форма которого при сжатии меняется (но не меняется область контакта), а ГУД — «жесткий» пьезоэлемент, форма которого при сжатии не меняется. ГУД обеспечивают двукратное увеличение расхода жидкости Q_a по сравнению с ГУН. Средний расход жидкости Q_a от 500 пл/с (для частоты $f > 2.5$ кГц при ГУН; для $f > 2$ кГц при ГУД) препятствует распространению тепла от микрозахвата внутрь микронасоса. Результаты моделирования показали, что полученная модель может быть использована для разработки компактного микронасоса с гибкой системой управления режимами прокачки жидкости для охлаждения микрозахвата. Получена аналитическая формула, связывающая Q_a с параметрами режима работы микронасоса, которую можно использовать в системе управления устройством в реальном времени.

В работе [53] представлены математическая и компьютерная модели пьезоэлектрического микронасоса. Методом ортогонального центрального композиционного планирования (ОЦКП) [19, 54] проведен параметрический анализ рабочего режима пьезоэлектрического микронасоса в зависимости от внутреннего и внешнего радиусов трубки и частоты колебаний пьезоэлементов. Получено, что эффективность работы насоса увеличивается при увеличении внутреннего радиуса трубки R_1 и частоты f и уменьшении относительной толщины стенки трубки R_2/R_1 . Полученные при разработке прототипа микронасоса приближенные аналитические формулы позволяют определить параметры устройства для обеспечения необходимого среднего расхода жидкости. При применении микронасоса для подачи жидкости в камеру охлаждения микрозахвата необходимо обеспечить расход жидкости $Q_a > 800$ пл/с, предотвращающий теплоперенос в обратном направлении. Для этого нужно использовать трубку с внутренним диаметром $R_1 > 1.25$ мм и систему из пяти пьезоэлементов с частотой колебаний $f > 1.5$ кГц при величине радиального сжатия 5 мкм.

8. Система охлаждения капиллярного микрозахвата

В работе [8] представлено компьютерное численное моделирование двумерной модели системы жидкостного охлаждения камеры микрозахвата. На рис. 22 обозначены границы изучаемой мо-

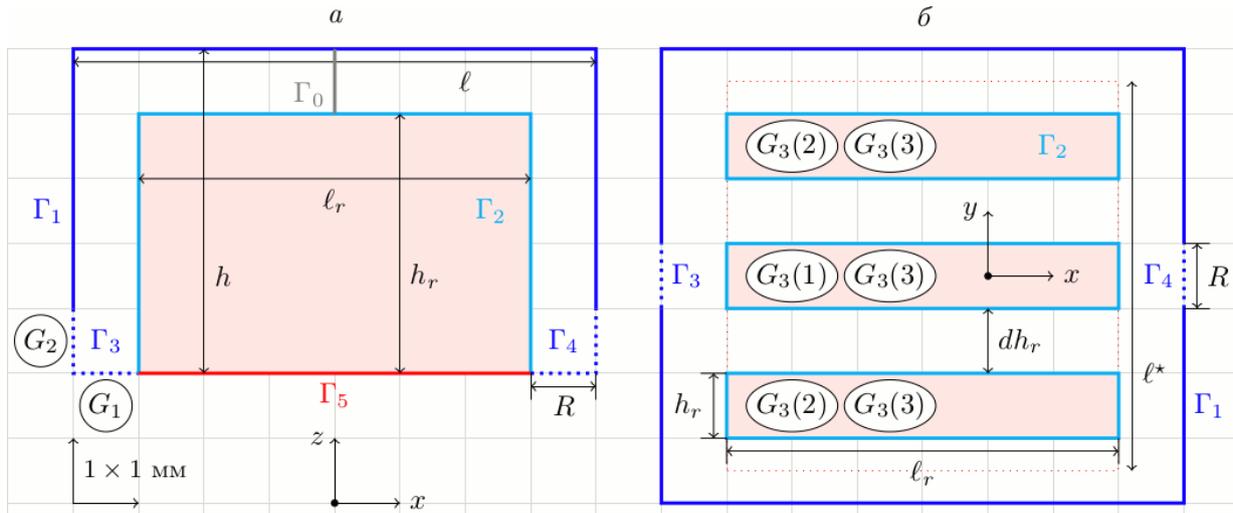


Рис. 22. Геометрия микрозахвата. Сечение Oxz с вертикальным Γ_1 и горизонтальным Γ_2 расположением входного и выходного каналов (а); сечение Oxy для радиатора с i ребрами $G_3(i)$ (б)

дели: внутренняя стенка Γ_1 ; контакт радиатор–жидкость Γ_2 ; входное Γ_3 и выходное Γ_4 отверстия; контакт радиатор–элемент Пельтье Γ_5 . Рассматривается геометрия с вертикальным Γ_1 и горизонтальным Γ_2 расположением входного и выходного каналов. Геометрия в горизонтальной плоскости $G_3(i)$ строится с различным количеством радиаторов $i = 1, 2, 3, 5$. Отметим, что G_1 , G_2 и $G_3(i)$ не являются сечениями одной конструкции, а относятся к разным вариантам конструкции микрозахвата.

Построены математические модели течения жидкости; переноса тепла жидкостью; теплообмена между жидкостью и радиатором; теплообмена между радиатором и элементом Пельтье. Уравнения гидродинамики и переноса тепла записывались в вариационной форме и решались в программе численного моделирования [22].

Определены правила выбора размеров радиатора для различного количества ребер, обеспечивающих оптимальный отвод тепла охлаждающей жидкостью. Проанализированы различные механизмы, участвующие в переносе тепла: теплообмен между жидкостью и радиатором; движение жидкости; теплопроводность в самой жидкости.

Для нестационарного течения под действием осцилляций расхода жидкости температура радиатора T_m выходит на периодический колебательный режим с частотой f , а пиковые значения за период могут значительно превышать температуру в стационарном режиме, что необходимо учитывать при проектировании технического устройства. Время установления периодического режима совпадает со временем установления стационарного режима для случая постоянной амплитуды скорости.

В системах контроля и управления техническим устройством необходимо менять параметры работы в реальном времени. Простые аналитические формулы для системы управления в виде элемента вычислительного стенда (ЭВС) строятся с помощью аппроксимаций результатов полного численного моделирования. Поскольку решаемая задача зависит от нескольких параметров, то влияние этих параметров на эффективность охлаждения определялась с помощью метода ОЦКП. Изучено влияние на эффективность охлаждения радиатора следующих параметров: геометрии внутренней камеры микрозахвата и радиатора, расположение входного и выходного каналов, вводимая в систему тепловая мощность, скорость течения жидкости во входном канале. В геометрии G_1 и G_2 с элементом Пельтье мощностью $W = 1$ Вт радиатор нагревается до температуры $\Delta T_m \approx 8 \div 26^\circ\text{C}$ в зависимости от коэффициента теплопередачи между жидкостью и радиатором α и скорости жидкости u_m . В G_3 при тех же параметрах — до $\Delta T_m \approx 3 \div 16^\circ\text{C}$ и с ростом количества ребер радиатора ΔT_m снижается. Нестационарное течение охлаждающей жидкости может значительно снизить эффективность системы охлаждения. На основе результатов компьютерного моделирования получены аналитические формулы, которые можно использовать в системе управления микрозахватом.

В работе [55] проводится математическое и компьютерное исследование системы жидкостного охлаждения капиллярного микрозахвата. Построены математические модели течения жидкости через камеру микрозахвата, нагрева радиатора горячей стороной элемента Пельтье и передача тепла от

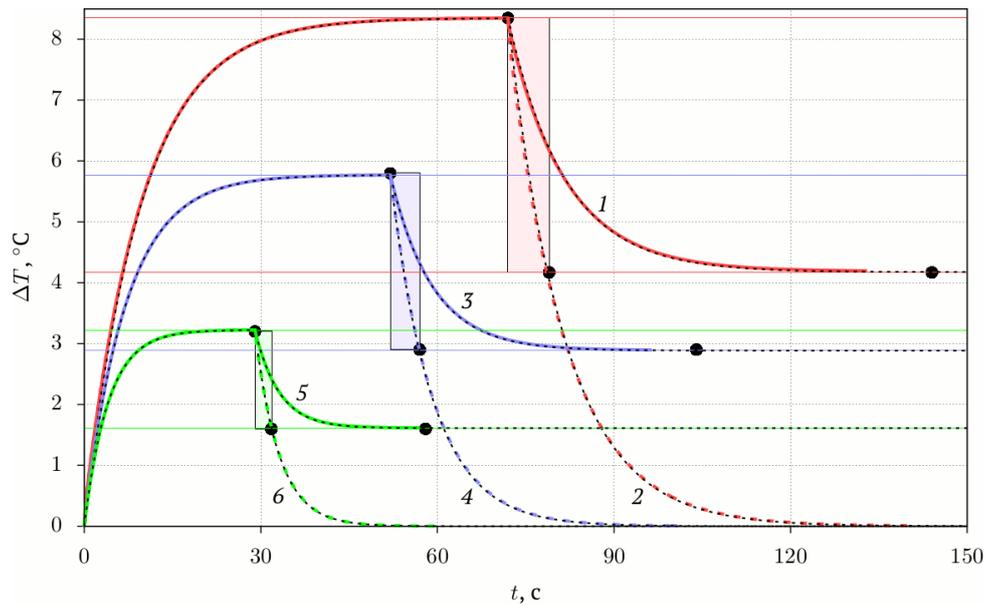


Рис. 23. Зависимость ΔT [°C] от времени t для геометрий G_2 (красные линии), G_3^1 (синие линии) и G_3^3 (зеленые линии). Смена режима работы с $W = 1$ Вт на режим $W = 0.5$ Вт (сплошные линии) или $W = 0$ Вт (пунктирные линии). Асимптоты рабочих режимом обозначены тонкими сплошными линиями. $\alpha = 1.5$ кВт/(м²·К); $u_m = 2$ см/с; размеры камеры 8×8 мм. Аналитические аппроксимации — черные пунктирные линии. Закрашенные области — «быстрое» переключение режимов

радиатора жидкости. Для компьютерного моделирования уравнения записывались в вариационной форме и решались методом конечных элементов в программе решения дифференциальных уравнений FreeFem++. Для повышения точности расчетов использовалась динамическая адаптивная расчетная сетка. Поскольку физические величины зависят от температуры, проведена аппроксимация этих величин по табличным значениям в виде полиномов с помощью метода наименьших квадратов. Для контроля точности и продолжительности расчета определялась тепловая мощность, выводимая жидкостью из системы. Расчет продолжался пока эта величина не совпадала с вводимой в систему тепловой мощностью с точностью 0.1 %. Определялись следующие величины: максимальная установившаяся на радиаторе температура и время выхода системы охлаждения на рабочий режим. Проведен анализ переключения системы охлаждения с одного рабочего режима на другой. Получено, что время установления рабочего режима совпадает с продолжительностью переключения на другой режим работы и не зависит от тепловой мощности элемента Пельтье, что позволило предложить механизм «быстрого» переключения режимов. По результатам численного расчета построены однопараметрические аналитические аппроксимации для зависимости температуры радиатора от времени, а также продолжительности «быстрого» переключе-

ния (примеры переключений показаны на рис. 23). Методом ОЦКП проведен анализ зависимости максимальной установившейся температуры радиатора и времени выхода на рабочий режим от размера радиатора и камеры. На базе проведенных вычислительных экспериментов получено, что с увеличением размера радиатора эффективность системы охлаждения увеличивается, но требуется большее время для установления рабочего режима.

Компьютерная модель пьезоэлектрического микронасоса была адаптирована для расчетов устройства для сглаживания низкочастотных пульсаций расхода жидкости (демпфер перепада давления) [56]. Данное устройство может быть использовано для сглаживания пульсаций течения жидкости на выходе перистальтических насосов и уменьшения колебаний температуры на радиаторе в системе охлаждения микроразхвата.

9. Заключение

Приведенные в этой работе методики, специфические подходы к синтезу моделей и ориентированность результатов на их использование в процедурах синтеза конструкций робототехнических устройств с экстремальными эксплуатационными характеристиками подтверждают междисциплинарный характер робототехники как направления науки и техники, требующего использования не столько системного, сколько комплексного подхо-

да к решению поставленных проблем. Также следует отметить, что в ходе исследований активно использовалось свободное программное обеспечение. В работе [57] приведены примеры построения модели с применением *FreeFem++* [22]/*Gmsh* [58] и *FreeCAD* [59]/*CalculiX* [60] (с использованием интерфейса программы и параметрического скрипта на языке *Python*). В работе [54] предложены скрипты *Scilab* [61] для повышения точности аппроксимации методом наименьших квадратов, а также приведена схема проведения вычислительных экспериментов методом ортогонального центрального композиционного планирования. В [62] проведен анализ свободных программных средств для динамической визуализации результатов моделирования нестационарных физических явлений. На примере решения пяти физических задач (модифицированное логистическое уравнение Ферхюльста–Пирла [63] для популяционной динамики; естественная тепловая конвекция Рэлея–Бенара [64]; автоколебательная химическая реакция Белоусова–Жаботинского [65] на примере модели брюсселятора; колебание груза на упругом растяжимом стержне в поле тяжести; кинематика модульного колесного мобильного робота [66–68]) показаны способы анимации параметрических аналитических зависимостей в *Gnuplot* [69], отображения двумерных пространственно распределенных динамических процессов с помощью видеофайла, построения трехмерной модели в программе компьютерной графики *Blender* [70]. Дополнительно представлен способ повышения эффективности использования вычислительных ресурсов с помощью разделения вычислительного этапа и этапа обработки и визуализации результатов моделирования на примере универсального *Python*–скрипта для построения трехмерных траекторий по внешним исходным данным в *Blender*.

С точки зрения практики особый интерес представляют методики получения и непосредственно сами аналитические решения, которые позволяют реализовать системы управления в реальном времени даже на бортовых компьютерах, обладающих скромными вычислительными возможностями. Анализ результатов моделирования работы системы охлаждения микрозахвата, в свою очередь, позволил найти способы сокращения межоперационного времени при микроманипуляциях за счет работы в окрестностях рабочей точки элемента Пельтье.

Список литературы

- [1] Convery N., Gadegaard N. 30 years of microfluidics // *Micro and Nano Engineering*. 2019. V. 2. Pp. 76–91. DOI: 10.1016/j.mne.2019.01.003
- [2] Berg J.M., Dallas T. Peristaltic Pumps. *Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics* (eds. by Li D.). New York: Springer, 2015. Pp. 2693–2701. DOI: 10.1007/978-0-387-48998-8_1198
- [3] *Microfluidics Based Microsystems: Fundamentals and Applications*. Eds. by Kakaç S., Kosoy B., Li D., Pramuanjaroenkij A. Dordrecht: NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology. Springer. 2010. 618 p. DOI: 10.1007/978-90-481-9029-4
- [4] Patankar S.V., "Numerical heat transfer and fluid flow". Taylor and Francis, 1980.
- [5] Cotta R.M., Knupp D.C., Naveira-Cotta C.P. *Analytical Heat and Fluid Flow in Microchannels and Microsystems*. Cham: Springer. 2016. 164 p. DOI: 10.1007/978-3-319-23312-3
- [6] Даринцев О.В., Мигранов А.Б. Капиллярный микрозахват с обратной связью. Патент на изобретение № 2261795. Оpubл. 10.10.2005. Бюл. № 28. https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2261795&TypeFile=html
- [7] Darintsev O. *Microgrippers: Principle of Operation, Construction, and Control Method // Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2021. V. 187. Pp. 25–37. Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-15-5580-0_2
- [8] Насибуллаев И.Ш., Даринцев О.В. Компьютерное двумерное моделирование системы жидкостного охлаждения микрозахвата // *Вычислительные технологии*. 2021. Т. 26, № 2. С. 4–20. DOI: 10.25743/ICT.2021.26.2.002
- [9] Raval S., Patel B. A Review on Grasping Principle and Robotic Grippers // *International Journal of Engineering Development and Research*. 2016. Vol. 4. Pp. 483–490.
- [10] DiSalvo F.J. Thermoelectric Cooling and Power Generation // *Science*. 1999. Vol. 285, No. 5428. Pp. 703–706. DOI: 10.1126/science.285.5428.703
- [11] Deasy M.J., Baudin N., O'Shaughnessy S.M., Robinson A.J. Simulation-driven design of a passive liquid cooling system for a thermoelectric generator // *Applied Energy*. 2017. V. 205. Pp. 499–510. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.07.127.
- [12] Afshari F. Experimental and numerical investigation on thermoelectric coolers for comparing air-to-water to air-to-air refrigerators // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020. DOI: 10.1007/s10973-020-09500-6
- [13] Jami F., Tullius, Robert Vajtai, Yildiz Bayazitoglu. A Review of Cooling in Microchannels // *Heat Transfer Engineering*. 2011. V. 32, No. 7–8. Pp. 527–541. DOI: 10.1080/01457632.2010.506390
- [14] Chien-Yuh Yang, Chun-Ta Yeh, Wei-Chi Liu, Bing-Chwen Yang. Advanced Micro-Heat Exchangers for High Heat Flux // *Heat Transfer Engineering*. 2007. V. 28, No. 8–9. Pp. 788–794, DOI: 10.1080/01457630701328676
- [15] Nonino C., Del Giudice S., Savino S. Temperature-Dependent Viscosity and Viscous Dissipation Effects in Microchannel Flows With Uniform Wall Heat Flux. *Heat Transfer Engineering*. 2010. V. 31, No. 8. Pp. 682–691. DOI: 10.1080/01457630903466670
- [16] Насибуллаев И.Ш., Насибуллаева Э.Ш. Влияние температуры на динамику течения жидкости в технических системах с жиклерами // *Труды Института механики им. П.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН*. 2016. Т. 11, № 1. С. 1–9. DOI: 10.21662/uim2016.1.001
- [17] Laser D.J., Santiago J.G. A review of micropumps // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2004. V. 14. Pp. R35–R64. DOI: 10.1088/0960-1317/14/6/R01

- [18] Fluid-structure Interaction: Modelling, Simulation, Optimization. Eds. by Bungartz H.J., Schäfer M. Heidelberg: Springer. 2006. 401 p.
DOI: [10.1007/3-540-34596-5](https://doi.org/10.1007/3-540-34596-5)
- [19] Насибуллаев И.Ш. Разработка компьютерной модели основного элемента агрегата дозирования топлива // Вычислительные технологии. 2016. Т. 21, № 2. Pp. 26–41.
eLIBRARY ID: [28886942](https://elibrary.ru/28886942)
- [20] Bruus H. Theoretical microfluidics. Lecture notes third edition. MIC Department of Micro and Nanotechnology Technical University of Denmark. 2006. 237 p.
- [21] Chiang Ch.-Yu, Pironneau O., Sheu T., Thiriet M. Numerical Study of a 3D Eulerian Monolithic Formulation for Incompressible Fluid-Structures Systems // Fluids. 2017. V. 2, No. 2. Pp. 34–53.
DOI: [10.3390/fluids2020034](https://doi.org/10.3390/fluids2020034)
- [22] Hecht F. New development in FreeFem++ // Journal of Numerical Mathematics. 2012. V. 20, No. 3–4. Pp. 251–265.
DOI: [10.1515/jnum-2012-0013](https://doi.org/10.1515/jnum-2012-0013)
- [23] Насибуллаев И.Ш., Даринцев О.В. Двумерная динамическая модель взаимодействия жидкости и пьезоэлектрического привода с поперечным изгибом в плоском канале // Многофазные системы. 2019. Т. 14, № 4. С. 220–232.
DOI: [10.21662/mfs2019.4.029](https://doi.org/10.21662/mfs2019.4.029)
- [24] Насибуллаев И.Ш., Насибуллаева Э.Ш., Даринцев О.В. Моделирование течения жидкости через деформируемый пьезоэлементом эластичный микроканал системы охлаждения микрозахвата // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20, № 12. С. 740–750.
DOI: [10.17587/mau.20.740-750](https://doi.org/10.17587/mau.20.740-750)
- [25] Nasibullayev I.Sh., Darintsev O.V., Nasibullaeva E.Sh. and Bogdanov D.R. Piezoelectric Micropumps for Microrobotics: Operating Modes Simulating and Analysis of the Main Parameters of the Fluid Flow Generation // Smart Innovation, Systems and Technologies. 2021. V. 187. Pp. 525–536. Springer, Singapore.
DOI: [10.1007/978-981-15-5580-0_43](https://doi.org/10.1007/978-981-15-5580-0_43)
- [26] Насибуллаев И.Ш., Насибуллаева Э.Ш., Денисова Е.В. Динамика течения жидкости в технических системах с жиклерами // Известия Уфимского научного центра РАН. 2015. № 4. С. 20–25.
eLIBRARY ID: [25732231](https://elibrary.ru/25732231)
- [27] Насибуллаев И.Ш., Насибуллаева Э.Ш. Течение жидкости через систему связанных элементов технического устройства типа труба–гидросопротивление–труба // Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН. 2016. Т. 11, № 2. С. 141–149.
DOI: [10.21662/uim2016.2.021](https://doi.org/10.21662/uim2016.2.021)
- [28] Насибуллаев И.Ш., Насибуллаева Э.Ш. Течение жидкости через гидросопротивление с динамически изменяемой геометрией // Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН. 2017. Т. 12, № 1. С. 59–66.
DOI: [10.21662/uim2017.1.009](https://doi.org/10.21662/uim2017.1.009)
- [29] Nasibullayev I.Sh., Nasibullaeva E.Sh., Darintsev O.V. Computer Axisymmetric Model of a Piezoelectric Micropump // Journal of Engineering Science and Technology Review. 2021. V. 14, No. 2. Pp. 152–164.
DOI: [10.25103/jestr.14.2.19](https://doi.org/10.25103/jestr.14.2.19)
- [30] Насибуллаев И.Ш., Насибуллаева Э.Ш. Осесимметричное течение вблизи критической точки на подвижной границе // Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН. 2010. Т. 7, № 1. С. 82–190.
DOI: [10.21662/uim2010.1.016](https://doi.org/10.21662/uim2010.1.016)
- [31] Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.Г. Численные методы. 8-е изд. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2000.
- [32] Сивухин Д.В. Общий курс физики. М.: Наука. 1979. Т. I. Механика. 520 с.
- [33] Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т. 1. М.: Наука, 1970. 492 с.
- [34] Насибуллаев И.Ш., Насибуллаева Э.Ш. Влияние различных видов силы трения на движение поршня в трубе // Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН. 2011. Т. 8, № 1. С. 257–265.
DOI: [10.21662/uim2011.1.025](https://doi.org/10.21662/uim2011.1.025)
- [35] Насибуллаев И.Ш., Насибуллаева Э.Ш. Движение поршня в цилиндрической трубе с учетом вязкого трения // Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН. 2012. Т. 9, № 2. С. 107–112.
DOI: [10.21662/uim2012.2.059](https://doi.org/10.21662/uim2012.2.059)
- [36] Насибуллаев И.Ш., Насибуллаева Э.Ш., Денисова Е.В. Влияние различных видов силы трения в системе двух коаксиальных цилиндров // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 10. С. 54–59.
eLIBRARY ID: [22307858](https://elibrary.ru/22307858)
- [37] Насибуллаева Э.Ш., Денисова Е.В., Насибуллаев И.Ш. Расширенная математическая модель функционирования агрегата дозирования топлива // Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН. 2011. Т. 8, № 1. С. 249–256.
DOI: [10.21662/uim2011.1.024](https://doi.org/10.21662/uim2011.1.024)
- [38] Насибуллаев И.Ш., Насибуллаева Э.Ш., Денисова Е.В. Схема проведения вычислительного эксперимента для построения элемента исследовательского стенда агрегата дозирования топлива // Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН. 2014. Т. 10, № 1. С. 87–89.
DOI: [10.21662/uim2014.1.016](https://doi.org/10.21662/uim2014.1.016)
- [39] Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука. 1976. 280 с.
- [40] Денисова Е.В., Насибуллаев И.Ш., Насибуллаева Э.Ш., Черникова М.А. Течение жидкости в канале при малых перепадах давления: сравнение уравнений Бернулли и Навье-Стокса // Известия Уфимского научного центра РАН. 2014. № 4. С. 17–23.
eLIBRARY ID: [24326738](https://elibrary.ru/24326738)
- [41] Ландау Л., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика. М.: Наука, 1988. 736 с.
- [42] Batchelor G.K. An introduction to fluid dynamics. Cambridge University Press. 2000. 615 p.
DOI: [10.1017/CBO9780511800955](https://doi.org/10.1017/CBO9780511800955)
- [43] Денисова Е.В., Насибуллаева Э.Ш., Насибуллаев И.Ш. Исследование динамических процессов в элементах топливной автоматики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 5. С. 31–36.
- [44] Денисова Е.В., Мурашкин М.Ю., Насибуллаев И.Ш., Насибуллаева Э.Ш. Применение наноструктурных материалов в топливной автоматике // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 8. С. 47–52.
eLIBRARY ID: [21884314](https://elibrary.ru/21884314)
- [45] Хватов Б.Н. Влияние состояния поверхностного слоя на кинетику кавитационного разрушения гидротурбинной стали // Вестник ТГТУ. 2002. Т. 8, № 3. С. 507–512.
eLIBRARY ID: [18909409](https://elibrary.ru/18909409)
- [46] Патент на изобретение № 2550287, приоритет изобретения 30.12.2013 г. «Поршень с антикавитационной обработкой поверхности для устройства дозирования топлива», авторы: Урманчев С.Ф., Насибуллаева Э.Ш., Денисова Е.В., Черникова М.А., Мурашкин М.Ю., Насибуллаев И.Ш.
- [47] Насибуллаев И.Ш., Насибуллаева Э.Ш. Исследование кавитационной устойчивости поверхности алюминиевого поршня // Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН. 2017. Т. 12, № 2. С. 143–151.
DOI: [10.21662/uim2017.2.021](https://doi.org/10.21662/uim2017.2.021)
- [48] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 7. Теория упругости. М.: Наука. 1987. 248 с.

- [49] Аганин А.А., Ильгамов М.А., Хисматуллина Н.А. Деформация поверхности тела при ударе водяной струи // Известия Уфимского научного центра РАН. 2015. № 3. С. 12–18.
eLIBRARY ID: 24216955
- [50] Насибуллаев И.Ш., Насибуллаева Э.Ш., Даринцев О.В. Изучение течения жидкости через деформируемый пьезоэлементом канал // Многофазные системы. 2018. Т. 13, № 3. С. 1–10.
DOI: 10.21662/mfs2018.3.001
- [51] Sandberg G., Wernberg P.-A., Davidsson P. Fundamentals of Fluid-Structure Interaction. In Computational Aspects of Structural Acoustics and Vibration // CISM International Centre for Mechanical Sciences. V. 505. Vienna: Springer, 2009.
DOI: 10.1007/978-3-211-89651-8_2
- [52] Насибуллаев И.Ш. Снижение систематической погрешности среднего расхода жидкости в осесимметричной компьютерной модели пьезоэлектрического микронасоса // Многофазные системы. 2021. Т. 16, № 1. С. 20–31.
DOI: 10.21662/mfs2021.1.004
- [53] Nasibullayev I.Sh., Nasibullaeva E.Sh., Darintsev O.V. Dependence of the Piezoelectric Micropump Operating Mode on Its Geometry // Journal of Physics: Conference Series. V. 2096, No. 1 P. 012081.
DOI: 10.1088/1742-6596/2096/1/012081
- [54] Насибуллаев И.Ш. Использование свободных программ для обработки и визуализации результатов научных исследований // Многофазные системы. 2021. Т. 16, № 2. С. 58–71.
DOI: 10.21662/mfs2021.2.009
- [55] Насибуллаев И.Ш. Аналитический анализ переключения рабочего режима в двумерной модели системы жидкостного охлаждения микрозахвата // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2021. Т. 25, № 3(93). С. 120–131.
DOI: 10.54708/19926502_2021_25393120
- [56] Насибуллаев И.Ш., Насибуллаева Э.Ш., Даринцев О.В. Осесимметричная модель микроустройства со сглаживанием пульсаций потока жидкости // В сборнике: XIV всероссийская мультиконференция по проблемам управления МКПУ-2021. Материалы XIV мультиконференции: в 4 т. Ростов-на-Дону. 2021. С. 49–51.
eLIBRARY ID: 47458521
- [57] Насибуллаев И.Ш. Применение свободных программ FreeFem++/Gmsh и FreeCAD/CalculiX для моделирования статических задач упругости // Многофазные системы. 2020. Т. 15, № 3–4. С. 183–200.
DOI: 10.21662/mfs2020.3.129
- [58] Geuzaine C., Remacle J.-F. Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 2009. Vol. 79, No. 11. P. 1309–1331.
DOI: 10.1002/nme.2579
- [59] FreeCAD homepage.
<https://www.freecadweb.org/>
(дата обращения: 22.01.2022 г.)
- [60] Dhondt G. The Finite Element Method for Three-Dimensional Thermomechanical Applications. Wiley. 2004.
DOI: 10.1002/0470021217
- [61] Campbell S.L., Chancelier J.-Ph., Nikoukhah R. Modeling and Simulation in Scilab/Scicos with ScicosLab 4.4. 2010. Springer, New York, NY. 330 p.
DOI: 10.1007/978-1-4419-5527-2
- [62] Насибуллаев И.Ш. Использование свободного ПО для визуализации результатов моделирования динамических процессов // Многофазные системы. 2021. Т. 16, № 3–4. С. 121–143.
DOI: 10.21662/mfs2021.3.016
- [63] Базыкин А.Д. Математическая биофизика взаимодействующих популяций. Москва: Наука. 1985. 181 с.
- [64] Гетлинг А.В. Конвекция Рэлея–Бенара. Структуры и динамика. М: Эдиториал УРСС. 247 с.
- [65] Белоусов Б.П. Периодически действующая реакция и ее механизм. Сб.: Автоволновые процессы в системах с диффузией. Горький: Институт прикладной физики АН СССР. 1981. 287 с.
- [66] Darintsev O.V., Nasibullayev I.S., Bogdanov D.R. Inspection of pipelines of complex topology using an adaptive, scalable multi-segment mobile robot // Communications in Computer and Information Science. 2021. Vol. 1426. Pp. 137–150.
DOI: 10.1007/978-3-030-88458-1_11
- [67] Nasibullayev I., Darintsev O., Bogdanov D. In-Pipe Modular Robot: Configuration, Displacement Principles, Standard Patterns and Modeling // Smart Innovation, Systems and Technologies. 2022. Vol. 232. Pp. 85–96. Springer, Singapore.
DOI: 10.1007/978-981-16-2814-6_8
- [68] Мигранов А.Б., Богданов Д.Р., Даринцев О.В., Насибуллаев И.Ш., Копьев А.С. Модульный мобильный робот для проведения инспекции трубопроводов сложной топологии // В сборнике: XIV всероссийская мультиконференция по проблемам управления МКПУ-2021. Материалы XIV мультиконференции: в 4 т. Ростов-на-Дону. 2021. С. 196–198.
eLIBRARY ID: 47458488
- [69] Gnuplot homepage.
<http://www.gnuplot.info/>
(дата обращения: 07.12.2021)
- [70] Филиппов С.В. Программная платформа Blender как среда моделирования объектов и процессов естественно-научных дисциплин // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018. № 230. 42 с.
DOI: 10.20948/prepr-2018-230



Synthesis of new microfluidics models in the research in the “Robotics and Control in Technical Systems” laboratory

Darintsev O.V.

Mavlyutov Institute of Mechanics UFRC of the RAS, Ufa, Russia

Robotics is an interdisciplinary scientific direction, therefore, when solving a number of problems, it becomes necessary to conduct research that is typical for other areas of science. So, when synthesizing new types of equipment in the «Robotics and Control in Technical Systems» laboratory, more accurate characteristics of individual components and assemblies were required, which ultimately led to a whole cycle of work on microfluidics. Of particular interest in the work performed is the development of new microdevices, since this involves the construction of a single complex of new mathematical and computer models that link hydrodynamics, elasticity theory, heat transfer process, parametric optimization and control theory. The first models were obtained that describe the movement of a piston fixed by an elastic spring in a pipe, taking into account the influence of dry viscous types of friction. By the method of factorial computational experiment, analytical dependencies were obtained for the main part of the fuel dosing unit – servo piston. Next, mathematical and computer models were built to analyze the fluid flow through a channel with variable geometry. Based on the simulation results, the design of a new micromechanical device – a piezoelectric micropump consisting of an elastic tube and annular piezoelements located on it, the sequential oscillation of which creates a non-zero average fluid flow, was refined. In the course of the adaptation of the model, an effective design of the device for smoothing fluid flow pulsations was obtained. These devices were developed and calculated for use in the liquid cooling system of capillary microgripper. A parametric analysis of the process of cooling the hot side of the Peltier element of the microgripper was carried out with a change in the following gripper parameters: the size and shape of the radiator, the coolant flow rate and the heat transfer coefficient. The results of the analysis of temperature fluctuations of the radiator under unsteady fluid flow confirmed the expected dependences of the cooling efficiency on the chosen geometry of the radiator and low-frequency fluid flow fluctuations.

Keywords: microfluidics, microrobotics, hydraulic resistance, dynamically variable channel geometry, piezoelectric micropump, capillary microgripper, fluid cooling system

References

- [1] Convery N., Gadegaard N. 30 years of microfluidics. *Micro and Nano Engineering*. 2019. V. 2. Pp. 76–91.
DOI: [10.1016/j.mne.2019.01.003](https://doi.org/10.1016/j.mne.2019.01.003)
- [2] Berg J.M., Dallas T. Peristaltic Pumps. *Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics* (eds. by Li D.). New York: Springer, 2015. Pp. 2693–2701.
DOI: [10.1007/978-0-387-48998-8_1198](https://doi.org/10.1007/978-0-387-48998-8_1198)
- [3] *Microfluidics Based Microsystems: Fundamentals and Applications*. Eds. by Kakaç S., Kosoy B., Li D., Pramuanjaroenkij A. Dordrecht: NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology. Springer. 2010. 618 p.
DOI: [10.1007/978-90-481-9029-4](https://doi.org/10.1007/978-90-481-9029-4)
- [4] Patankar S.V., "Numerical heat transfer and fluid flow". Taylor and Francis, 1980.
- [5] Cotta R.M., Knupp D.C., Naveira-Cotta C.P. *Analytical Heat and Fluid Flow in Microchannels and Microsystems*. Cham: Springer. 2016. 164 p.
DOI: [10.1007/978-3-319-23312-3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-23312-3)
- [6] Darintsev O.V., Miganov A.B. [Capillary micro-grip with feedback] Capilarnyi microzхват s obratnoi svazju. Patent RF No. 2261795 RU, [Published] Opublikovano 10.10.2005. Byul. N. 28 (in Russian).
https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2261795&TypeFile=html
- [7] Darintsev O. Microgrippers: Principle of Operation, Construction, and Control Method. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2021. V. 187. Pp. 25–37. Springer, Singapore.
DOI: [10.1007/978-981-15-5580-0_2](https://doi.org/10.1007/978-981-15-5580-0_2)

- [8] Nasibullayev I.Sh., Darintsev O.V. [Computer 2D modelling of a micro-grip fluid cooling system]. *Vychislitel'nyye tekhnologii* [Computational technologies]. 2021. V. 26. No. 2. Pp. 4–20 (in Russian). DOI: [10.25743/ICT.2021.26.2.002](https://doi.org/10.25743/ICT.2021.26.2.002)
- [9] Raval S., Patel B. A Review on Grasping Principle and Robotic Grippers. *International Journal of Engineering Development and Research*. 2016. Vol. 4. Pp. 483–490.
- [10] DiSalvo F.J. Thermoelectric Cooling and Power Generation. 1999. Science. Vol. 285, no. 5428. Pp. 703–706. DOI: [10.1126/science.285.5428.703](https://doi.org/10.1126/science.285.5428.703)
- [11] M.J. Deasy, N. Baudin, S.M. O'Shaughnessy, A.J. Robinson. Simulation-driven design of a passive liquid cooling system for a thermoelectric generator. *Applied Energy*. V. 205, 2017, pp. 499–510, DOI: [10.1016/j.apenergy.2017.07.127](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.127).
- [12] Afshari F. Experimental and numerical investigation on thermoelectric coolers for comparing air-to-water to air-to-air refrigerators. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020. DOI: [10.1007/s10973-020-09500-6](https://doi.org/10.1007/s10973-020-09500-6)
- [13] Jami F. Tullius, Robert Vajtai, Yildiz Bayazitoglu. A Review of Cooling in Microchannels. *Heat Transfer Engineering*. 2011. V. 32, No 7–8. P. 527–541. DOI: [10.1080/01457632.2010.506390](https://doi.org/10.1080/01457632.2010.506390)
- [14] Chien-Yuh Yang, Chun-Ta Yeh, Wei-Chi Liu, Bing-Chwen Yang. Advanced Micro-Heat Exchangers for High Heat Flux. *Heat Transfer Engineering*. 2007. V. 28, No 8–9. Pp. 788–794, DOI: [10.1080/01457630701328676](https://doi.org/10.1080/01457630701328676)
- [15] C. Nonino, S. Del Giudice, S. Savino. Temperature-Dependent Viscosity and Viscous Dissipation Effects in Microchannel Flows With Uniform Wall Heat Flux. *Heat Transfer Engineering*. 2010. V. 31, No 8. Pp. 682–691. DOI: [10.1080/01457630903466670](https://doi.org/10.1080/01457630903466670)
- [16] Nasibullayev I.Sh., Nasibullaeva E.Sh. [The effect of temperature on the dynamics of fluid flow in technical systems with jets]. *Transactions of the Institute of Mechanics named after R.R. Mavlyutov, Ufa Scientific Center, Russian Academy of Sciences* [Trudy Instituta mehaniki im. R.R. Mavlyutova], Ufimskiy Nauchnyi Centr RAN]. 2016. V. 11, No. 1. P. 1–9 (In Russian). DOI: [10.21662/uim2016.1.001](https://doi.org/10.21662/uim2016.1.001)
- [17] Laser D.J., Santiago J.G. A review of micropumps. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2004. V. 14. Pp. R35–R64. DOI: [10.1088/0960-1317/14/6/R01](https://doi.org/10.1088/0960-1317/14/6/R01)
- [18] Fluid-structure Interaction: Modelling, Simulation, Optimization. Eds. by Bungartz H.J., Schäfer M. Heidelberg: Springer. 2006. 401 p. DOI: [10.1007/3-540-34596-5](https://doi.org/10.1007/3-540-34596-5)
- [19] Nasibullayev I.Sh. [The development of a computer model for the main element of the fuel metering unit] *Razrabotka kompyuternoy modeli osnovnogo elementa agregata dozirovaniya topliva. Vychislitelnye tekhnologii* [Computational Technologies]. 2016. V. 21, No. 2. Pp. 26–41. (In Russian). eLIBRARY ID: 28886942
- [20] Bruus H. Theoretical microfluidics. Lecture notes third edition. MIC Department of Micro and Nanotechnology Technical University of Denmark. 2006. 237 p.
- [21] Chiang Ch.-Yu, Pironneau O., Sheu T., Thiriet M. Numerical Study of a 3D Eulerian Monolithic Formulation for Incompressible Fluid-Structures Systems. *Fluids*. 2017. V. 2, No. 2. P. 34–53. DOI: [10.3390/fluids2020034](https://doi.org/10.3390/fluids2020034)
- [22] Hecht F. New development in FreeFem++ // *Journal of Numerical Mathematics*. 2012. V. 20, No. 3–4. Pp. 251–265. DOI: [10.1515/jnum-2012-0013](https://doi.org/10.1515/jnum-2012-0013)
- [23] Nasibullayev I.Sh., Darintsev O.V., [Two-dimensional dynamic model of the interaction of a fluid and a piezoelectric bending actuator in a plane channel] *Dvumernaya dinamicheskaya model' vzaimodeystviya zhidkosti i p'yezelektricheskogo privoda s poperechnym izgibom v ploskom kanale*. *Multiphase Systems [Mnogofaznyye sistemy]*. 2019. V. 14, No. 4. Pp. 220–232 (In Russian). DOI: [10.21662/mfs2019.4.029](https://doi.org/10.21662/mfs2019.4.029)
- [24] Nasibullayev I.Sh., Nasibullaeva E.Sh., Darintsev O.V., [Simulation of fluid flow through an elastic microchannel deformed by a piezoelement in microgrip cooling systems] *Modelirovaniye techeniya zhidkosti cherez deformiruyemyy p'yezelementom elastichnyy mikrokanal sistemy okhlazhdeniye mikrozhakvata*. *Mechatronics, automation, control [Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie]*. 2019. V. 20, No. 12. Pp. 740–750 (In Russian). DOI: [10.17587/mau.20.740-750](https://doi.org/10.17587/mau.20.740-750)
- [25] Nasibullayev I.Sh., Darintsev O.V., Nasibullaeva E.Sh. and Bogdanov D.R. Piezoelectric Micropumps for Microrobotics: Operating Modes Simulating and Analysis of the Main Parameters of the Fluid Flow Generation. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2021. V. 187. Pp. 525–536. Springer, Singapore. DOI: [10.1007/978-981-15-5580-0_43](https://doi.org/10.1007/978-981-15-5580-0_43)
- [26] Nasibullayev I.Sh., Nasibullaeva E.Sh., Denisova E.V. [Dynamics of fluid flow in technical systems with jets] *Dinamika techeniya zhidkosti v tekhnicheskikh sistemakh s zhiklerami*. *Bulletin of the Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences [Izvestiya Ufimskogo Nauchnogo Centra RAN]*. 2015. No. 4. Pp. 20–25 (In Russian). eLIBRARY ID: 25732231
- [27] Nasibullayev I.Sh., Nasibullaeva E.Sh. [The fluid flow through a system of connected elements of a technical device such as pipe-hydraulic resistance–pipe] *Techeniye zhidkosti cherez sistemu svyazannykh elementov tekhnicheskogo ustroystva tipa trubagidrosoprotivleniye–truba*. *Transactions of the Institute of Mechanics named after R.R. Mavlyutov, Ufa Scientific Center, Russian Academy of Sciences* [Trudy Instituta mehaniki im. R.R. Mavlyutova], Ufimskiy Nauchnyi Centr RAN]. 2016. V. 11, No. 2. Pp. 141–149 (In Russian). DOI: [10.21662/uim2016.2.021](https://doi.org/10.21662/uim2016.2.021)
- [28] Nasibullayev I.Sh., Nasibullaeva E.Sh. [Fluid flow through hydraulic resistance with dynamically changing geometry] *Techeniye zhidkosti cherez gidrosoprotivleniye s dinamicheskimi izmenyayemoy geometriyey*. *Transactions of the Institute of Mechanics named after R.R. Mavlyutov, Ufa Scientific Center, Russian Academy of Sciences* [Trudy Instituta mehaniki im. R.R. Mavlyutova], Ufimskiy Nauchnyi Centr RAN]. 2017. V. 12, No. 1. Pp. 59–66 (In Russian). DOI: [10.21662/uim2017.1.009](https://doi.org/10.21662/uim2017.1.009)
- [29] Nasibullayev I.Sh., Nasibullaeva E.Sh., Darintsev O.V. Computer Axisymmetric Model of a Piezoelectric Micropump. *Journal of Engineering Science and Technology Review*. 2021. V. 14, No. 2. Pp. 152–164. DOI: [10.25103/jestr.142.19](https://doi.org/10.25103/jestr.142.19)
- [30] Nasibullayev I.Sh., Nasibullaeva E.Sh. [Axisymmetric flow near the critical point on the moving boundary] *Osesimmetrichnoye techeniye vblizi kriticheskoy tochki na podvizhnoy granitse*. *Transactions of the Institute of Mechanics named after R.R. Mavlyutov, Ufa Scientific Center, Russian Academy of Sciences* [Trudy Instituta mehaniki im. R.R. Mavlyutova], Ufimskiy Nauchnyi Centr RAN]. 2010. V. 7, No 1. Pp. 82–190 (In Russian). DOI: [10.21662/uim2010.1.016](https://doi.org/10.21662/uim2010.1.016)
- [31] Bakhvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobelkov G.G. [Numerical methods. 8th ed. Moscow: Basic Knowledge Laboratory] *Chislennyye metody. 8-ye izd. M.: Laboratoriya Bazovykh Znaniy*. 2000. (In Russian)
- [32] Sivukhin D.V. [General course of physics. V. I. Mechanics. M.: Science] *Obshchiy kurs fiziki. M.: Nauka. 1979. T. I. Mekhanika*. 1979. 520 p. (In Russian)
- [33] Sedov L. I. [Continuum mechanics. V. 1. M.: Nauka] *Mekhanika sploshnoy sredy. T. 1. M.: Nauka*. 1970. 492 p. (In Russian)
- [34] Nasibullayev I.Sh., Nasibullaeva E.Sh. [Influence of various types of frictional force on the movement of the piston in the pipe] *Vliyaniye razlichnykh vidov sily treniya na dvizheniye porshnya v trube*. *Transactions of the Institute of Mechanics named after R.R. Mavlyutov, Ufa Scientific Center, Russian Academy of Sciences* [Trudy Instituta mehaniki im. R.R. Mavlyutova], Ufimskiy Nauchnyi Centr RAN]. 2011. V. 8, No 1. Pp. 257–265 (In Russian). DOI: [10.21662/uim2011.1.025](https://doi.org/10.21662/uim2011.1.025)

- [35] Nasibullayev I.Sh., Nasibullaeva E.Sh. [The movement of the piston in a cylindrical tube with viscous friction] *Dvizheniye porshnya v tsilindricheskoy trube s uchedom vyazkogo treniya. Transactions of the Institute of Mechanics named after R.R. Mavlyutov, Ufa Scientific Center, Russian Academy of Sciences* [Trudy Instituta mehaniki im. R.R. Mavlyutova], Ufimskiy Nauchnyi Centr RAN]. 2012. V. 9, No 2. Pp. 107–112 (In Russian). DOI: [10.21662/uim2012.2.059](https://doi.org/10.21662/uim2012.2.059)
- [36] Nasibullayev I.Sh., Nasibullaeva E.Sh., Denisova E.V. [Influence of different types of friction force in the system of two coaxial cylinders] *Vliyaniye razlichnykh vidov sily treniya v sisteme dvukh koaksial'nykh tsilindrov. Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye*. 2014. No 10. Pp. 54–59 (In Russian). eLIBRARY ID: [22307858](https://elibrary.ru/22307858)
- [37] Nasibullaeva E.Sh., Denisova E.V., Nasibullayev I.Sh. [Full-size mathematical model of the fuel metering unit] *Rasshirennaya matematicheskaya model' funktsionirovaniya agregata dozirovaniya topliva. Transactions of the Institute of Mechanics named after R.R. Mavlyutov, Ufa Scientific Center, Russian Academy of Sciences* [Trudy Instituta mehaniki im. R.R. Mavlyutova], Ufimskiy Nauchnyi Centr RAN]. 2011. V. 8, No 1. Pp. 249–256 (In Russian). DOI: [10.21662/uim2011.1.024](https://doi.org/10.21662/uim2011.1.024)
- [38] Nasibullayev I.Sh., Nasibullaeva E.Sh., Denisova E.V. [Scheme of the computational experiment for the construction of an element of the research stand of the fuel metering unit] *Skhema provedeniya vychislitel'nogo eksperimenta dlya postroyeniya elementa issledovatel'skogo stenda agregata dozirovaniya topliva. Transactions of the Institute of Mechanics named after R.R. Mavlyutov, Ufa Scientific Center, Russian Academy of Sciences* [Trudy Instituta mehaniki im. R.R. Mavlyutova], Ufimskiy Nauchnyi Centr RAN]. 2014. V. 10, No 1. Pp. 87–89. DOI: [10.21662/uim2014.1.016](https://doi.org/10.21662/uim2014.1.016)
- [39] Adler Yu.P., Markova Ye.V., Granovskiy Yu.V. [Design of experiment in the search for optimal conditions] *Planirovaniye eksperimenta pri poiske optimalnykh usloviy*. M.: Nauka, 1976. 280 p. (in Russian).
- [40] Denisova E.V., Nasibullayev I.Sh., Nasibullaeva E.Sh., Chernikova M.A. [Fluid flow in a channel at low pressure drops: a comparison of the Bernoulli and Navier-Stokes equations] *Techniye zhidkosti v kanale pri malykh perepadakh davleniya: sravneniye uravneniy Bernulli i Nav'ye-Stoksa. Bulletin of the Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences* [Izvestiya Ufimskogo Nauchnogo Centra RAN]. 2014. No 4. Pp. 17–23. eLIBRARY ID: [24326738](https://elibrary.ru/24326738)
- [41] Landau L.D., Lifshitz E.M. *Theoretical physics. V. 6. Fluid Mechanics*. M.: Nauka, 1988. 736 p. (In Russian).
- [42] Batchelor G.K. *An introduction to fluid dynamics*. Cambridge University Press. 2000. 615 p. DOI: [10.1017/CBO9780511800955](https://doi.org/10.1017/CBO9780511800955)
- [43] Denisova E.V., Nasibullaeva E.Sh., Nasibullayev I.Sh. [Study of dynamic processes in the elements of fuel automation] *Issledovaniye dinamicheskikh protsessov v elementakh toplivnoy avtomatiki. Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye*. 2014. № 5. Pp. 31–36 (In Russian).
- [44] Denisova E.V., Murashkin M.Yu., Nasibullayev I.Sh., Nasibullaeva E.Sh. [Application of nanostructured materials in fuel automation] *Primeneniye nanostrukturnykh materialov v toplivnoy avtomatike. Nano- and microsystem technology* [Nano- i mikrosistemnaya tekhnika]. 2014. No 8. Pp. 47–52 (In Russian). eLIBRARY ID: [21884314](https://elibrary.ru/21884314)
- [45] Khvatov B.N. [Influence of the state of the surface layer on the kinetics of cavitation destruction of hydroturbine steel] *Vliyaniye sostoyaniya poverkhnostnogo sloya na kinetiku kavitatsionnogo razrusheniya gidroturbinnoy stali. Vestnik TSTU*. 2002. V. 8, No 3. Pp. 507–512 (In Russian). eLIBRARY ID: [18909409](https://elibrary.ru/18909409)
- [46] Invention Patent No. 2550287, Invention Priority Dec. 30, 2013 «Piston with anti-cavitation surface treatment for fuel dosing device», authors: Urmancheev S.F., Nasibullaeva E.Sh., Denisova E.V., Chernikova M.A., Murashkin M.Yu., Nasibullayev I.Sh. (In Russian)
- [47] Nasibullayev I.Sh., Nasibullaeva E.Sh. [Investigation of the cavitation stability of an aluminum piston surface based on a three-dimensional model] *Issledovaniye kavitatsionnoy ustoychivosti poverkhnosti alyuminiyevogo porshnya. Transactions of the Institute of Mechanics named after R.R. Mavlyutov, Ufa Scientific Center, Russian Academy of Sciences* [Trudy Instituta mehaniki im. R.R. Mavlyutova], Ufimskiy Nauchnyi Centr RAN]. 2017. V. 12, No 2. Pp. 143–151 (In Russian). DOI: [10.21662/uim2017.2.021](https://doi.org/10.21662/uim2017.2.021)
- [48] Landau L.D., Lifshitz E.M. [Theoretical physics. V. 7. Theory of Elasticity] *Teoreticheskaya fizika. T. 7. Teoriya uprugosti*. M.: Nauka. 2003. P. 259. (in Russian).
- [49] Aganin A.A., Ilgamov M.A., Khismatullina N.A. [Deformation of the body surface when hit by a water jet] *Deformatsiya poverkhnosti tela pri udare vodyanoy strui. Bulletin of the Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences* [Izvestiya Ufimskogo Nauchnogo Centra RAN]. 2015. No 3. Pp. 12–18 (In Russian). eLIBRARY ID: [24216955](https://elibrary.ru/24216955)
- [50] Nasibullayev I.Sh., Nasibullaeva E.Sh., Darintsev O.V. [Study of fluid flow through a channel deformed by piezoelement] *Izucheniye techeniya zhidkosti cherez deformiruyemyy p'yezoelementom kanal. Mnogofaznyye sistemy* [Multiphase Systems]. 2018. V. 13, No. 3. Pp. 1–10 (In Russian). DOI: [10.21662/mfs2018.3.001](https://doi.org/10.21662/mfs2018.3.001)
- [51] Sandberg G., Wernberg P.-A., Davidsson P. *Fundamentals of Fluid-Structure Interaction. In Computational Aspects of Structural Acoustics and Vibration*. CISM International Centre for Mechanical Sciences. V. 505. Vienna: Springer, 2009. DOI: [10.1007/978-3-211-89651-8_2](https://doi.org/10.1007/978-3-211-89651-8_2)
- [52] Nasibullayev I.Sh. [Reducing the systematic error of the average fluid flow rate in axisymmetric computer model of piezoelectric micropump] *Snizheniye sistematicheskoy pogreshnosti srednego rashoda zhidkosti v osesimmetrichnoy komp'yuternoy modeli p'yezoelektricheskogo mikronasosa. Mnogofaznyye sistemy* [Multiphase Systems]. 2021. V. 16, No 1. Pp. 20–31. (In Russian). DOI: [10.21662/mfs2021.1.004](https://doi.org/10.21662/mfs2021.1.004)
- [53] Nasibullayev I.Sh., Nasibullaeva E.Sh., Darintsev O.V. Dependence of the Piezoelectric Micropump Operating Mode on Its Geometry. *Journal of Physics: Conference Series*. V. 2096, no. 1 P. 012081. DOI: [10.1088/1742-6596/2096/1/012081](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2096/1/012081)
- [54] Nasibullayev I.Sh. [Application of free software for processing and visualization of scientific research results] *Ispol'zovaniye svobodnykh programm dlya obrabotki i vizualizatsii rezul'tatov nauchnykh issledovaniy. Multiphase Systems* [Mnogofaznyye sistemy]. 2021. V. 16, No 2. Pp. 58–71 (In Russian). DOI: [10.21662/mfs2021.2.009](https://doi.org/10.21662/mfs2021.2.009)
- [55] Nasibullayev I.Sh. [Analytical analysis of operating mode switching in a 2D model of a fluid cooling system of the micro-gripper] *Analiticheskiy analiz pereklyucheniya rabocheho rezhima v dvumernoy modeli sistemy zhidkostnogo okhlazhdeniya mikrozhakhvata. Vestnik USATU* [Vestnik UGATU]. 2021. Vol. 25, N. 3 (93). Pp. 120–131 (in Russian). DOI: [10.54708/19926502_2021_25393120](https://doi.org/10.54708/19926502_2021_25393120)
- [56] Nasibullayev I.Sh., Nasibullaeva E.Sh., Darintsev O.V. [Axisymmetric model of a microdevice with smoothing of fluid flow pulsations] *Osesimmetrichnaya model' mikroustroystva so sglazhivaniyem pul'satsiy potoka zhidkosti*. In: XIV All-Russian Multi-Conference on Control Problems MKPU-2021. Materials of the XIV multicongress: in 4 vol. Rostov-on-Don. [V sbornike: XIV vsrossiyskaya mul'tikonferentsiya po problemam upravleniya MKPU-2021]. 2021. Pp. 49–51 (In Russian). eLIBRARY ID: [47458521](https://elibrary.ru/47458521)
- [57] Nasibullayev I.Sh. [Application of free software FreeFem++/Gmsh and FreeCAD/CalculiX for simulation of static elasticity problems] *Primeneniye svobodnykh programm FreeFem++/Gmsh i FreeCAD/CalculiX dlya modelirovaniya staticheskikh strukturnykh zadach. Multiphase Systems* [Mnogofaznyye sistemy]. 2020. V. 15, No. 3–4. Pp. 183–200 (In Russian). DOI: [10.21662/mfs2020.3.129](https://doi.org/10.21662/mfs2020.3.129)

- [58] Geuzaine C., Remacle J.-F. Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2009. Vol. 79, No. 11. P. 1309–1331. DOI: 10.1002/nme.2579
- [59] FreeCAD homepage. <https://www.freecadweb.org/> (accessed: 22.01.2022 r.)
- [60] Dhondt G. *The Finite Element Method for Three-Dimensional Thermomechanical Applications*. Wiley. 2004. DOI: 10.1002/0470021217
- [61] Campbell S.L., Chancelier J.-Ph., Nikoukhah R. *Modeling and Simulation in Scilab/Scicos with ScicosLab 4.4*. 2010. Springer, New York, NY. 330 p. DOI: 10.1007/978-1-4419-5527-2
- [62] Насибуллаев И.Ш. [Application of free software to visualize the results of simulation of dynamic processes] *Ispol'zovaniye svobodnogo PO dlya vizualizatsii rezul'tatov modelirovaniya dinamicheskikh protsessov*. Multiphase Systems [Mnogofaznyye sistemy]. 2021. V. 16, No 3–4. Pp. 121–143 (In Russian). DOI: 10.21662/mfs2021.3.016
- [63] Bazykin A.D. [Mathematical biophysics of interacting populations] *Matematicheskaya biofizika vzaimodeystviyushchikh populyatsiy*. Moskva: Nauka. 1985. 181 p. (In Russian).
- [64] Getling A.V. [Rayleigh-Benard convection. Structures and dynamics] *Konvektsiya Releya-Benara. Struktury i dinamika*. M: Editorial URSS. 247 p. (In Russian).
- [65] Belousov B.P. [Periodically acting reaction and its mechanism] *Periodicheski deystviyushchaya reaktsiya i yeye mekhanizm*. Collection of abstracts on radiation medicine for 1958 [*Sbornik referatov po radiatsionnoy meditsine za 1958 g.*]. M: Medgiz. 1959 (In Russian).
- [66] Darintsev O.V., Nasibullayev I.S., Bogdanov D.R. Inspection of pipelines of complex topology using an adaptive, scalable multi-segment mobile robot. *Communications in Computer and Information Science*. 2021. Vol. 1426. Pp. 137-150. DOI: 10.1007/978-3-030-88458-1_11
- [67] Nasibullayev I., Darintsev O., Bogdanov D. In-Pipe Modular Robot: Configuration, Displacement Principles, Standard Patterns and Modeling. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. Vol. 232, pp. 85–96. Springer, Singapore. 2022. DOI: 10.1007/978-981-16-2814-6_8
- [68] Migranov A.B., Bogdanov D.R., Darintsev O.V., Nasibullaev I.Sh., Kopev A.S. Modular mobile robot for inspection of pipelines of complex topology. In: XIV All-Russian Multi-Conference on Control Problems MKPU-2021. Materials of the XIV multiconference: in 4 vol. Rostov-on-Don. [*V sbornike: XIV vsrossiyskaya mul'tikonferentsiya po problemam upravleniya MKPU-2021*]. 2021. Pp. 196–198 (In Russian). eLIBRARY ID: 47458488
- [69] Gnuplot homepage. <http://www.gnuplot.info/> (accessed: 07.12.2021)
- [70] Filippov S.V. [Blender software platform as an environment for modeling objects and processes in natural sciences] *Programmnaya platforma Blender kak sreda modelirovaniya ob'yektov i protsessov yestestvenno-nauchnykh distsiplin*. Preprints of IAM im. M.V. Keldysh [*Preprinty IPM im. M.V.Keldysha*]. 2018. No. 230. 42 p. (In Russian). DOI: 10.20948/prepr-2018-230