

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ И СТЕНДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОНИКИ ADC64Ecal В РЕЖИМЕ LEAKLESS

*И. А. Зур^{а, б, 1}, А. С. Федотов^{б, в}, Ю. В. Шафаревич^б, М. А. Медведева^б,
А. А. Шиш^г, Ю. А. Федотова^а, И. А. Балашов^в, А. А. Макаров^в,
Г. В. Мещеряков^в, С. Н. Базылев^в, А. В. Терлецкий^в, А. Ю. Дубровин^в*

^а Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета, Минск

^б Белорусский государственный университет, Минск

^в Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^г Мультипрофильная лаборатория АркоЛаб, Минск

Изложен подход к анализу гидродинамических характеристик элементов систем охлаждения и термостабилизации субдетекторов установки МРД, включающий математическое моделирование и стендовые испытания. Для моделирования течения хладоносителя использовались распределенная и дискретная модели. Для стендовых испытаний был разработан автоматизированный стенд, представляющий собой программно-аппаратный комплекс с вакуумным и циркуляционным насосами, датчиками давления, расхода и температуры жидкости. Конструкция стенда может изменяться в соответствии с поставленными испытательными задачами.

Экспериментально установлено, что при номинальном расходе хладоносителя 0,006 кг/с падение давления на одной магистрали охлаждения модулей ADC64Ecal составляет $\approx 0,12$ атм. Результаты численного расчета и экспериментальных измерений падения давления согласуются с расхождением не более 2%. Переход в режим leakless (абсолютное давление 0,4–0,9 атм) не изменяет расходонапорную характеристику панели Ecal по сравнению с режимом течения при давлении выше атмосферного.

Предлагаемый подход применим к широкому спектру задач по характеризации и пусконаладке элементов системы термостабилизации и охлаждения детектора ТРС и других субдетекторов установки МРД.

The paper presents an approach to studying the hydrodynamical properties of the cooling and thermal stabilization systems of MPD sub-detectors. It combines mathematical modelling with experimental verification. The setup includes vacuum and circulation pumps as well as pressure, flow, and temperature sensors. Experimental results show that at a nominal coolant flow rate of 0.006 kg/s on a single ECal panel a hydrodynamic pressure drop is about 0.12 atm. Numerical calculations and experimental measurements of the pressure drop agree within 2%. Research indicates that pressure changes in the vacuum tank (0.4–0.9 atm) do not affect the flow pressure characteristics of the ECal panel compared to atmospheric pressure. The proposed approach effectively addresses a variety of tasks related to the implementation of the cooling of MPD sub-detectors.

PACS: 47.85.lb; 47.10.ad; 02.70Dh; 28.41.Fr

¹E-mail: zur.ilya01@gmail.com

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия прогресс в области фундаментальной науки неотъемлемо связан с развитием физики атомного ядра и элементарных частиц. Значительный вклад в это развитие традиционно вносится в рамках экспериментальных исследований на коллайдерах и обеспечивается как повышением энергии пучков, так и совершенствованием детекторов, применяемых для получения информации о продуктах ядерных реакций [1, 2].

В настоящее время завершается создание многоцелевого детектора MPD ускорительного комплекса NICA [3], что требует решения ряда новых физико-технических задач. Одной из таких задач является обеспечение стабильного функционирования систем охлаждения и термостабилизации входящих в состав MPD детекторов. Так, для детекторов TPC и ECal создаются системы водяного охлаждения и термостабилизации, функционирующие при давлении ниже атмосферного (режим leakless) [4–6]. Создание такой системы происходит в несколько этапов, включающих 1) разработку радиаторов и теплообменных систем, размещаемых непосредственно внутри корпуса MPD; 2) дизайн подающих и отводящих магистралей с хладоносителем; 3) разработку сценариев автоматического управления и, наконец, 4) сборку и монтаж системы как единого целого.

Режим leakless, предотвращающий течь в системе, ограничивает максимально допустимое давление в системе атмосферным, что может привести к недостаточному для отвода тепла расходу хладоносителя. Вместе с тем перепад высот для системы охлаждения модулей ADC64ECal может достигать 8 м, что эквивалентно гидростатическому давлению 0,8 атм, вследствие чего возникает риск кавитации в системе [7]. В связи с этим создание системы охлаждения и термостабилизации требует предварительного гидравлического расчета. Для проведения такого расчета необходимо знать гидравлическое сопротивление и расходонапорные характеристики расположенных внутри MPD элементов системы.

Получить расходонапорные характеристики элементов можно посредством численного моделирования течения хладоносителя и стендовых испытаний. Испытательный стенд должен позволять исследовать течение хладоносителя в образце элемента системы охлаждения и термостабилизации при номинальном расходе хладоносителя и абсолютном давлении меньше атмосферного. Метод численного моделирования должен позволять рассчитывать течение в образце элемента системы с учетом вязкости, температуры и давления хладоносителя.

Целью данной работы является представление методик и результатов исследования гидродинамических характеристик элемента систем охлаждения и термостабилизации MPD на примере контура системы охлаждения модулей ADC64ECal. Для достижения цели решены следующие задачи:

- развиты методики численного моделирования для расчета расходонапорных характеристик элементов системы охлаждения;
- подготовлен испытательный стенд для гидродинамических экспериментов в режиме leakless;
- экспериментально и численно исследованы расходонапорные характеристики образца магистрали охлаждения модулей ADC64ECal.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Численное моделирование. В работе применяются два подхода к численному моделированию течения хладоносителя в контуре охлаждения модулей ADC64Ecal, представленные в табл. 1.

Таблица 1. Подходы к численному моделированию течения хладоносителя в контуре охлаждения модулей ADC64Ecal

Приближение	Программное обеспечение	Суть приближения
Дискретное	MatLab Simulink	Магистраль представляется в виде последовательности узлов. В узлах расчетной области согласно уравнению Дарси–Вейсбаха определяется падение давления
Непрерывное	COMSOL	Магистраль представляется в виде последовательности линий, на которых отыскивается решение аппроксимации уравнения Навье–Стокса

Для моделирования гидродинамики течения хладоносителя в 0D-приближении использовался программный пакет MatLab Simulink (Simscape Fluids). На рис. 1 представлены геометрические параметры магистрали системы охлаждения модулей ADC64Ecal, использованные при построении модели в Simscape Fluids.

Традиционный подход к анализу потерь давления в трубопроводах основывается на формулах Дарси–Вейсбаха. Потери давления на участке трубы ΔP задаются выражением (1):

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{u^2}{2} \rho, \quad (1)$$

где f — коэффициент трения Дарси; L — длина участка; D — гидравлический диаметр; u — скорость течения жидкости; ρ — плотность жидкости.

Полное падение давления на всей магистрали ΔP_{all} состоит из суммы падений давления на последовательных участках трубы ΔP_i и определяется выражением

$$\Delta P_{\text{all}} = \sum_i^N \Delta P_i. \quad (2)$$

Коэффициент трения Дарси f существенно зависит от характеристик потока, геометрии труб и шероховатости стенок. Важно отметить, что шероховатость поверхности труб ε начинает оказывать влияние при закритических течениях с профилем потока, имеющим значительный градиент скорости вблизи стенок. Для труб с шероховатыми и гладкими стенками его значение можно определить из эмпирического уравнения Колбрука–Уайта (3) [8, 9]:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{2,51}{\text{Re}\sqrt{f}} \right), \quad (3)$$

где Re — число Рейнольдса; ε — шероховатость стенок трубы, принятая для расчетов 0,1 мкм [10].

Решение уравнения Колбука–Уайта (3) аппроксимируется соотношением Хааланда [11]:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1,8 \log \left[\left(\frac{\varepsilon}{3,7D} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{\text{Re}} \right]. \quad (4)$$

Падение давления в отдельной трубке определяется суммой двух вкладов: падением из-за вязкого трения о стенки трубки (потери по длине) и потерями из-за неоднородностей трубки, таких как изгибы, деформации сечения и др. (местные потери). Последние могут учитываться при численном расчете путем добавления эквивалентной длины L_{add} к геометрической длине трубки L . Падение давления на участке трубки длиной $L + L_{\text{add}}$ при ламинарном режиме течения несжимаемой жидкости задается выражением

$$\Delta p_{f,A} = \frac{64\nu}{2D^2S} \frac{L + L_{\text{add}}}{2} \dot{m}_A, \quad (5)$$

где ν — кинематическая вязкость жидкости; S — площадь сечения трубы; \dot{m}_A — массовый расход через сечение.

Местные потери давления из-за поворота трубы без учета потерь по длине задаются выражением (6). Для плавно изогнутого сегмента трубы коэффициент потерь K рассчитывается как

$$K = 30 f_T C_{\text{angle}}, \quad (6)$$

где коэффициент угловой поправки C_{angle} рассчитывается по Келлеру [12] следующим образом:

$$C_{\text{angle}} = 0,0148\alpha - 3,9716 \cdot 10^{-5}\alpha^2. \quad (7)$$

Коэффициент f_T взят из литературных данных [13], α — угол поворота участка трубы.

Опишем численный эксперимент (COMSOL). Для верификации результатов 0D модели Simscare использовался альтернативный расчетный пакет COMSOL Multiphysics. Система 1D дифференциальных уравнений решалась методом конечных элементов с линейными базисными функциями для давления p и скорости \mathbf{u} . Динамика течения хладоносителя описывалась уравнениями Навье–Стокса для вязкой несжимаемой жидкости в гравитационном поле. Слагаемое $-1/2f|u|ud^{-1}$ в правой части уравнения (8) для импульса позволяет учесть вязкое трение, шероховатость стенок трубки и развитый параболический профиль скорости в сечении [14].

Предлагаемый подход позволяет на порядок увеличить скорость решения задачи по сравнению с полностью трехмерными уравнениями, сохраняя точность решения системы.

Аппроксимация уравнений Навье–Стокса имеет вид [14]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{\nabla P}{\rho} - \frac{1}{2} f \frac{|\mathbf{u}| \mathbf{u}}{D} + \mathbf{g}, \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0, \end{cases} \quad (8)$$

где \mathbf{g} — ускорение свободного падения.

Для однозначного решения системы дифференциальных уравнений (7) задаются следующие граничные и начальные условия: между входом и выходом магистрали

(рис. 2) задавался перепад давлений $\Delta P = 0,12$ атм. В качестве начального приближения для расчета задавалось нулевое значение скорости и давление, равное выходному. Для учета падения давления по длине использовалась формула Хааланда (4) с коэффициентом абсолютной шероховатости внутренней поверхности труб 0,1 мкм. Местные сопротивления, обусловленные изгибами, учитывались коэффициентами падения давления.

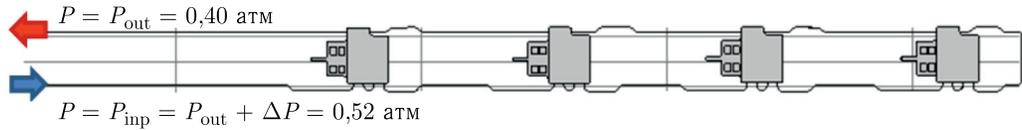


Рис. 2. Геометрия контура системы охлаждения модулей ADC64ECal для математической модели и граничные условия для перепада давления

Испытательный стенд. Для экспериментального исследования расходонапорных характеристик разработан автоматизированный испытательный стенд замкнутого цикла, фотография и схема которого представлены на рис. 3. В качестве испытуемого образца использовался образец магистрали охлаждения модулей ADC64ECal. Основным резервуаром с водой является вакуумный бак, над водным зеркалом которого установлена трубка, ведущая к вакуумному насосу. Непосредственно перед входом в образец установлен датчик абсолютного давления P2, а на выходе из образца — датчик абсолютного давления P4. Давление в баке контролируется с помощью датчика P1. Датчики T1–T3 используются для контроля температуры вдоль водяной магистрали во избежание нагрева воды вследствие вязкого трения при длительной эксплуатации стенда. В середине подающего и отводящего хладоноситель от образца участки установлены вихревые расходомеры G1 и G2, непосредственно перед входом в образец — ультразвуковой расходомер G3.

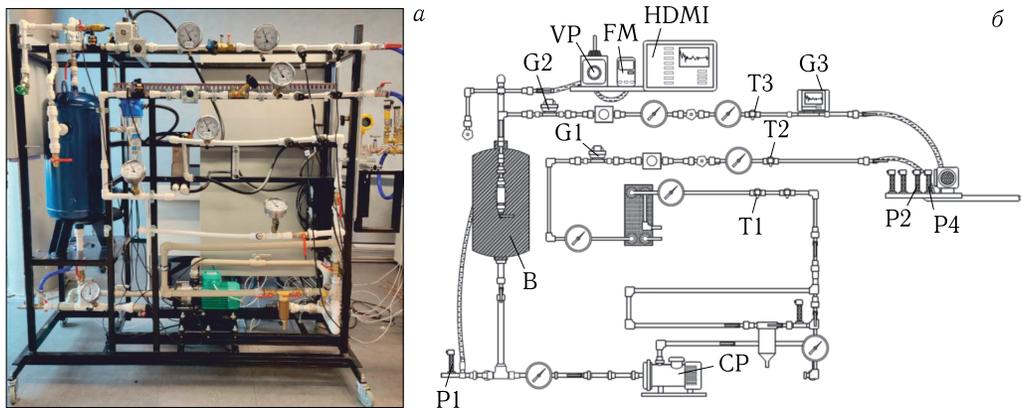


Рис. 3. Схема стенда для экспериментального тестирования контуров систем TPC и ECal установки MPD. CP и VP — циркуляционный и вакуумный насосы; FM — частотный преобразователь; G1 и G2 — датчики объемного расхода на прямом и обратном участках магистрали; G3 — ультразвуковой расходомер; P1 — датчик давления в вакуумном баке; P2 и P4 — датчики давления на прямом и обратном участках магистрали; T1–T3 — погружные датчики температуры



Рис. 4. Горизонтальное расположение контура системы охлаждения ECal с магистралями на стенде

На рис. 4 представлено фото подключения горизонтально расположенного элемента системы охлаждения модулей ADC64ECal к выходам раздающего и собирающего коллекторов посредством трубок из силикона.

Оборудование, использованное на стенде, для обеспечения циркуляции жидкости и измерений параметров потока представлено в табл. 2.

Таблица 2. Оборудование, использованное на испытательном стенде

Оборудование	Обозначение	Характеристики
Циркуляционный насос Wilo MHI1903-E-3-400-50-2/IE3	CP	Максимальный объемный расход воды $Q_{\max} = 16 \text{ м}^3/\text{ч}$ при подпоре $H_{\max} = 34 \text{ м}$
Вакуумный насос VALUE VE-115N	VP	Остаточное давление 5 Па, производительность 51 л/мин
Частотный преобразователь	FM	Диапазон частот 5–50 Гц
Датчик относительного давления wika a10	P1	Диапазон давлений –1–1,5 атм
Датчик относительного давления	P2	Диапазон давлений 0–6 атм
Датчик абсолютного давления	P4	Диапазон давлений 0–1 атм
Вихревые расходомеры SV3150	G1, G2	Диапазон расхода воды от 0,5 до 10 л/мин
Ультразвуковой расходомер Теккноу ФЛЕКСУС F608	G3	Диапазон скорости воды 0,01–25 м/с
Датчики температуры	T1–T3	Диапазон температур 273–373 К
HDMI-панель WEINTEK сMT3162X	HDMI	

Установленное оборудование позволяет обеспечить расходы и измерять давление теплоносителя во всем номинальном диапазоне значений для всех субдетекторов MPD.

Проведение эксперимента и обработка данных. Задачей каждой серии экспериментов является построение набора экспериментальных точек «падение давления ΔP — расход Q » образца контура системы охлаждения при заданном значении абсолютного давления в вакуумном баке $P_{\text{танк}}$. Для измерения одной экспериментальной точки $\{\Delta P_i, Q_i\}$ выполнялись действия, последовательность которых представлена на рис. 5.

Экспериментально измеренные расходонапорные характеристики $\Delta P(Q)$ были аппроксимированы параболической зависимостью падения давления от расхода в соот-

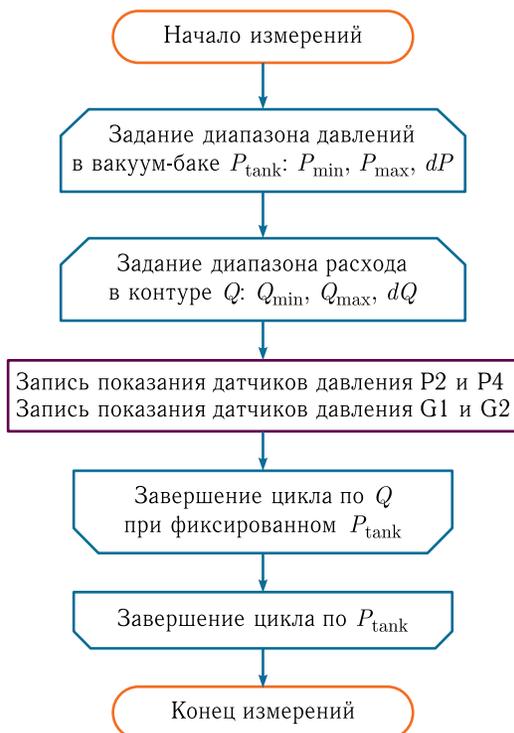


Рис. 5. Принципиальная схема алгоритма измерения расходонапорной характеристики образца ветвистии с законом Бернулли:

$$\Delta P = \frac{\rho u^2}{2}, \quad (9)$$

где ΔP — перепад давления.

Выражение (1) можно переписать, заменив скорость жидкости на объемный расход:

$$\Delta P = Aq^2, \quad (10)$$

где q — расход жидкости; A — константа, зависящая от гидродинамического сопротивления образца и свойств жидкости.

Выражение (2) использовалось для аппроксимации экспериментально полученных данных и оценки константы A , что позволит при известном расходе хладоносителя прогнозировать падение давления в различных участках системы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Результаты Simscape. Полученное в результате расчетов Simscape значение массового расхода хладоносителя составило 0,0057 кг/с при перепаде давления 0,12 атм. Полный расход на все контуры детектора ECal, согласно ТЗ, составляет 3,24 м³/ч. Результаты расчетов близки к предварительным оценкам, проведенным командой разработки ECal в ЛФВЭ [15].

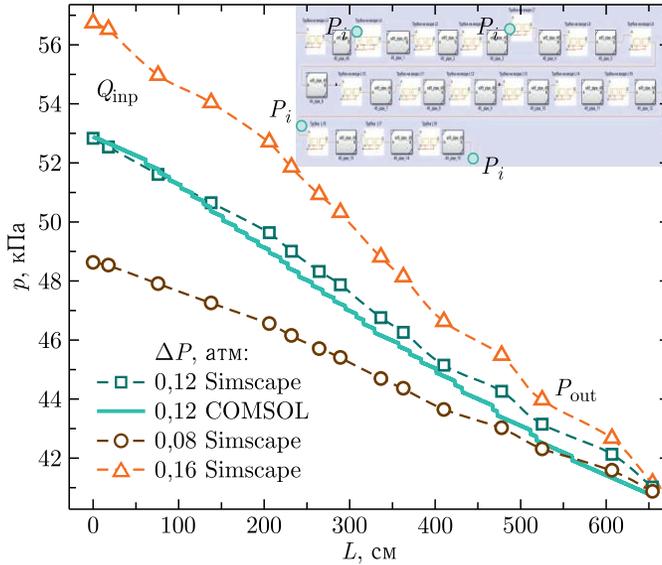


Рис. 6. Распределение давления в контрольных точках контура магистрали системы охлаждения модулей ADC64Ecal. На вставке — эквивалентная гидродинамическая схема участка магистрали с указанием точек измерения давления P_i

На рис.6 приведена зависимость давления P в контрольных точках магистрали системы охлаждения модулей ADC64Ecal для величин падения давления ΔP на образце 0,08, 0,12 и 0,16 атм, что эквивалентно объемным расходам 0,0047, 0,0059 и 0,0069 кг/с соответственно. Давление монотонно уменьшается от точки к точке и по абсолютным значениям согласуется с результатами модели COMSOL.

Результаты COMSOL. На рис.7 представлена цветовая карта распределения давления хладоносителя вдоль контура магистрали системы охлаждения модулей ADC64Ecal, полученная в COMSOL Multiphysics при перепаде давления $dP = 0,12$ атм. Объемный расход воды составил $0,021 \text{ м}^3/\text{ч}$ (на одну магистраль), что соответствует массовому расходу хладоносителя $0,0059 \text{ кг/с}$ (что находится в непосредственном согласии с предварительными оценками команды разработки Ecal). Средняя скорость прокачки хладоносителя по трубкам, находящимся в контакте с медными радиаторами (водоблоками), равна $0,47 \text{ м/с}$, что соответствует числу Рейнольдса $2,0 \cdot 10^3$, указывающему на ламинарный режим течения, близкий к переходному.

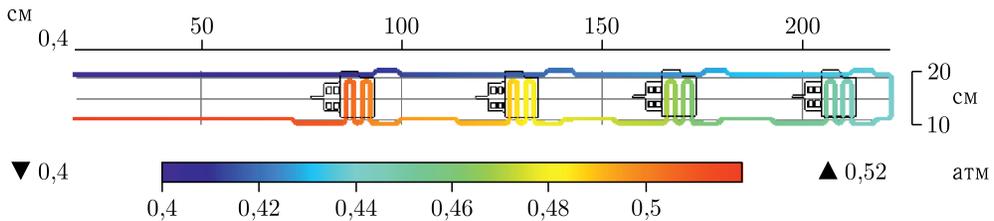


Рис. 7. Распределение давления вдоль контура магистрали системы охлаждения модулей ADC64Ecal

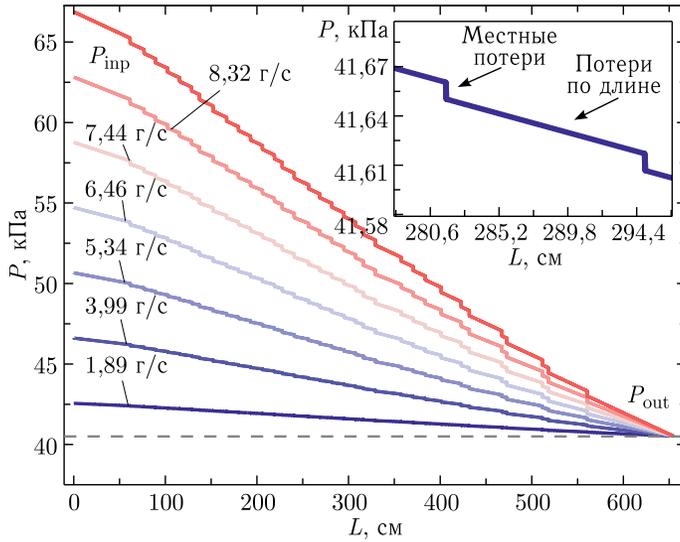


Рис. 8. Распределение давления вдоль контура магистрали системы охлаждения модулей ADC64Ecal

Из представленной на рис. 8 трассировки (линейного распределения вдоль контура) давления видно, что каждый участок кривой состоит из двух характерных элементов: линейной зависимости давления от координаты, что соответствует потерям по длине вследствие вязкого трения и ступенеобразного падения давления, которые можно атрибутировать местным сопротивлениям: углы, изгибы, развороты. Расчеты и трассировка давления приведены для перепадов давления между входной и выходной точками ΔP от 0,02 до 0,26 атм с шагом 0,04 атм.

Результаты стендовых испытаний. На рис. 9 представлена зависимость падения давления на нагрузке Ecal ΔP от массового расхода хладоносителя Q при давлении в вакуумном баке $P_{\text{tank}} = 0,75$ бар. Экспериментально полученная кривая в широ-

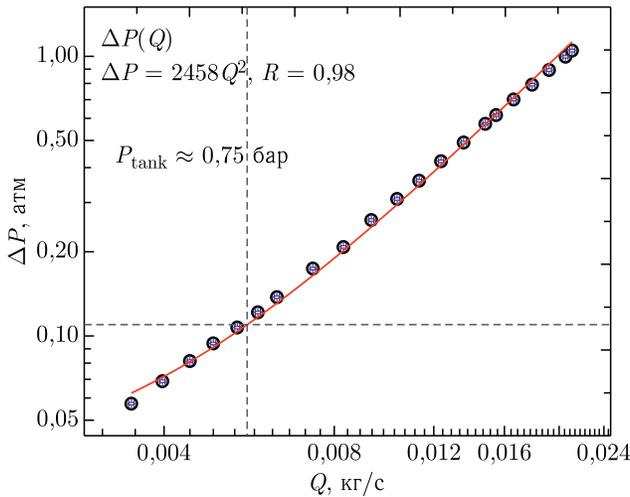


Рис. 9. Зависимость падения давления на образце магистрали охлаждения модулей ADC64Ecal ΔP от массового расхода хладоносителя Q при давлении в вакуумном баке $P_{\text{tank}} = 0,75$ бар

ком диапазоне значений расхода может быть с хорошей точностью аппроксимирована параболической зависимостью, что указывает на гидродинамический режим течения и возможность прогнозирования его параметров.

Сравнение результатов COMSOL, Simscape и стендовых испытаний.

На рис. 10 приведено сравнение результатов гидродинамических расчетов Simscape, COMSOL и стендовых испытаний магистрали охлаждения модулей ADC64Ecal. Как видно, экспериментальные измерения и две методики численного анализа при расходе 2,16 л/мин (0,13 м³/ч) дают значения падения давления 12 кПа с расхождением не более 5% относительно экспериментальных данных в диапазоне расходов 0,01–0,035 м³/ч (0,0028–0,0097 кг/с). Точки, соответствующие экспериментально полученным значениям падения давления, имеют область допустимых значений, соответствующих различным давлениям в вакуумном баке $P_{\text{tank}} = 0,90, 0,75, 0,40$ бар. Давление P_{tank} не оказывает существенного влияния на характеристики течения хладоносителя по исследуемому образцу и не изменяет его расходонапорную характеристику.

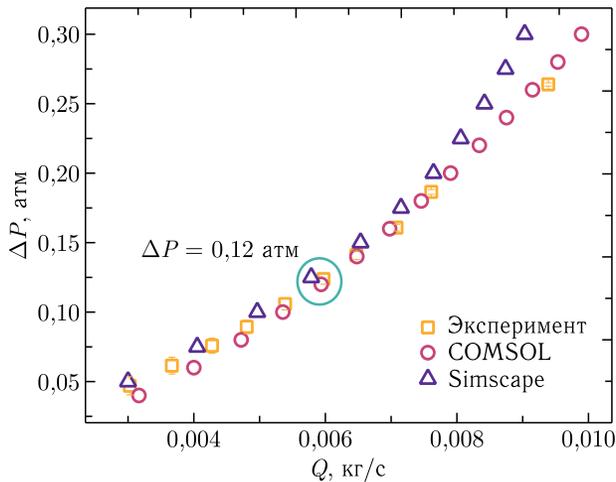


Рис. 10. Сравнение результатов гидродинамических расчетов COMSOL, Simscape и стендовых испытаний образца магистрали охлаждения модулей ADC64Ecal при давлении в вакуумном баке $P_{\text{tank}} = 0,90, 0,75, 0,40$ бар

В табл. 3 представлены значения расходов при падении давления 0,12 атм на магистрали охлаждения модулей ADC64Ecal, полученные различными методами: решением уравнения Навье–Стокса методом конечных элементов (COMSOL), решением уравнения Дарси–Вейсбаха (Simscape) и стендовыми испытаниями.

Таблица 3. Сравнение результатов гидродинамических расчетов COMSOL, Simscape и стендовых испытаний панелей Ecal

Методика	Q , кг/с	ΔP , атм
Simscape	0,0057	0,12
COMSOL	0,0059	0,12
Эксперимент	0,0058	0,12

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлено описание подхода к созданию систем охлаждения и термостабилизации детекторов установки МРД. Предлагаемый подход основан на комбинации математического моделирования и стендовых испытаний элементов системы.

В ходе проведения вычислительного эксперимента использованы две комбинированные методики: решение уравнения Дарси–Вейсбаха для падения давления в узлах дискретной аппроксимации контура и решение одномерной аппроксимации уравнения Навье–Стокса методом конечных элементов. Представленные методики численного моделирования течения хладоносителя позволяют получать значение давления в любой точке контура и рассчитывать его расходонапорную характеристику в широком диапазоне расходов.

Разработанный стенд для экспериментального тестирования модулей систем охлаждения и термостабилизации установки МРД в режиме leakless состоит из вакуумной и циркуляционной систем и подключаемой нагрузки — контуров охлаждения элементов субдетекторов установки МРД. Установленное оборудование позволяет обеспечить номинальное давление в вакуумном баке 0,35 атм, расход хладоносителя от 0,01 до 16 м³/ч и измерять относительное давление в диапазоне значений –1–1,5 атм.

При номинальном падении давления на контуре охлаждения модулей ADC64ECal, равном 0,12 атм, значение объемного расхода хладоносителя, полученное посредством дискретной и непрерывной моделей, составило величины 0,0057 и 0,0059 кг/с соответственно. Экспериментально установлено, что в диапазоне давлений в вакуумном баке 0,4–0,9 атм номинальный расход хладоносителя, равный 0,0058 кг/с, можно обеспечить при падении давления на нагрузке ≈ 12 кПа. Поскольку расходонапорная характеристика исследуемого образца не зависит от давления в вакуумном баке, то можно прогнозировать отсутствие влияния давления в вакуумном баке и на эффективность охлаждения электроники.

Результаты вычислительного эксперимента и стендовых испытаний согласуются с погрешностью, не превышающей 2 и 5 %, для непрерывной и дискретной моделей соответственно.

Каждая из примененных в процессе исследования методик может быть использована для своего спектра задач при пусконаладке системы охлаждения детекторов ТРС и ECal:

- гидродинамический расчет в программном пакете Simscape с учетом элементов автоматики послужит основой для разработки алгоритмов управления системой охлаждения и термостабилизации детекторов ТРС и ECal;
- гидродинамический расчет в пакете COMSOL полезен для детального исследования гидравлики системы и может быть дополнен для тепловых расчетов системы охлаждения и термостабилизации;
- стендовые испытания каждой подсистемы помогут верифицировать расчеты и протестировать системы на устойчивость в различных режимах.

Разработанные подходы успешно применены для испытаний всех элементов системы охлаждения и термостабилизации детекторов установки МРД, а также могут быть использованы для пусконаладочных работ и исследований в области гидродинамики (устойчивость режимов, гидроудар и др.).

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Благодарности. Выражаем благодарность младшему научному сотруднику НИИ ЯП БГУ Егору Евгеньевичу Шманаю за помощь при создании геометрии для 1D-задачи.

Финансирование. Работы выполнены при поддержке ОИЯИ в рамках контракта № 100-00627 от 16.12.2022 г. «Изготовление, поставка и монтаж систем термостабилизации и охлаждения детекторов TPC и ECal установки MPD».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shiltsev V., Zimmermann F.* Modern and Future Colliders // *Rev. Mod. Phys.* 2021. V. 93, No. 1. P. 015006.
2. *Wiedemann H.* Particle Accelerator Physics. Berlin; Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1993.
3. *Averyanov A. et al.* MPD TPC Status // *Phys. Atom. Nucl.* 2023. V. 86. P. 796–804.
4. *Галкин А. Д. и др.* Сравнение экспериментальных и расчетных результатов контроля температурных режимов работы электроники ROC-камеры детектора TPC для эксперимента MPD // *ЭЧАЯ.* 2023. Т. 54, вып. 6. С. 1221–1236.
5. *Semenov A. Yu. et al.* Electromagnetic Calorimeter for MPD Spectrometer at NICA Collider // *J. Instrum.* 2020. V. 15, No. 05. P. C05017–C05017.
6. *Abgaryan V. et al.* Status and Initial Physics Performance Studies of the MPD Experiment at NICA // *Eur. Phys. J. A.* 2022. V. 58, No. 7. P. 140.
7. *Перник А. Д., Пои Н. А.* Физический энциклопедический словарь. М.: Сов. энцикл., 1962. Т. 2. Е–Литий.
8. Experiments with Fluid Friction in Roughened Pipes // *Proc. Roy. Soc. Lond. Ser. Math. Phys. Sci.* 1937. V. 161, No. 906. P. 367–381.
9. *Colebrook C. F.* Turbulent Flow in Pipes, with Particular Reference to the Transition Region between the Smooth and Rough Pipe Laws // *J. Inst. Civ. Eng.* 1939. V. 11, No. 4. P. 133–156.
10. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. ГОСТ 8.586.1-2005. 2005.
11. *Некрасов Б. Б.* Гидравлика и ее применение на летательных аппаратах. М.: Машиностроение, 1967. 365 с.
12. *Keller G. R.* Hydraulic System Analysis. Revised ed. Penton Publ., Inc., 1985. 201 p.
13. *Crane V.* Flow of Fluids through Valves, Fittings & Pipe TP-410 Metric. Vervante; Metric edition. 1999. 114 p.
14. *Barnard A. C. L. et al.* A Theory of Fluid Flow in Compliant Tubes // *Biophys. J.* 1966. V. 6, No. 6. P. 717–724.
15. Охлаждающая вставка ADC64Ecal: КД. ООО «ПроМодз», 2019.

Получено 3 июля 2024 г.