

УДК 536.24, 62-503.5

ОПТИМИЗАЦИЯ ЛОКАЛЬНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ИМПАКТНОЙ СТРУЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

© М. П. Токарев, М. Ю. Ничик, О. А. Гобызов, И. А. Федотов,
В. М. Дулин

*Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1
E-mail: mtokarev@itp.nsc.ru*

Развитие методов управления потоком и теплообменом в затопленных турбулентных струях (импактных струях), натекающих на преграду, является важной задачей, поскольку такая конфигурация используется в различных технических приложениях. Технология активного управления потоком и оптимизация сигнала, управляющего внешним возмущением расхода в импактных струях, могут быть применены для эксплуатации присущих потоку свойств в целях дальнейшего улучшения теплообмена на стенке. Использована ИК-термография и проведены измерения методом PIV (Particle Image Velocimetry) для оптической диагностики температурных полей стенки и полей скорости в условиях управления возмущением расхода, в том числе с обратной связью от локального датчика скорости. Обнаружено, что низкоамплитудные синусоидальные возмущения увеличивают интегральную температуру на стенке за счёт интенсификации отрыва потока на стенке по сравнению с невозмущённой струей. Также установлено, что высокоамплитудные возмущения в режиме пульсирующей струи позволяют снизить интегральную температуру за счёт увеличения средней скорости потока вблизи стенки и скомпенсировать нежелательный эффект отрыва потока. Алгоритм генетического программирования позволил найти автоколебательный режим при возмущении струи с обратной связью, который улучшает локальный теплообмен на стенке не хуже, чем в случае вынужденного периодического возмущения.

Ключевые слова: теплообмен, турбулентная импактная струя, возмущения расхода, вынужденные колебания, автоколебания, обратная связь, машинное обучение.

DOI: 10.15372/AUT20230507

Введение. Струи, натекающие на преграду [1], широко применяются в промышленности благодаря их высоким теплообменным свойствам в случае однофазных потоков. Коэффициент теплопередачи для потоков, нормально натекающих на поверхность, выше, чем в случае тангенциального течения вдоль поверхности. Существует большое количество исследований, относящихся к теплообмену в импактных и свободных струйных потоках, начиная с ранних работ, в которых измерения проводились с помощью датчиков теплового потока и термографии на жидких кристаллах [2, 3], до более поздних, где используется высокоскоростная инфракрасная (ИК) термография, гильберт-оптика [4] и 3D-измерения скорости [5].

Различные методы увеличения теплообмена были протестированы со стратегиями пассивного управления путём изменения геометрии выходного отверстия сопла и модификации импактной поверхности с помощью генераторов вихрей и турбулентности [5, 6]. Другим классом методов улучшения теплопередачи является активное управление потоком (АУП), которое в основном реализуется путём внешнего возмущения струйного потока, изменяющего расход жидкости или газа через выходное сечение сопла. Типичная реализация АУП включает воздушную струю с громкоговорителем или цилиндром с движущимся поршнем в нагнетательной камере, приводящим к периодическому изменению среднего расхода в струе на безразмерных частотах $St = 0,3-3$ (St — число Струхалия) [7].

Известно, что на интенсивность теплообмена между стенкой и струёй влияет ряд параметров, а именно: расстояние от сопла до стенки (H/D), число Рейнольдса (Re), число Прандтля, профиль скорости струи. Хорошо известно, что если расстояние от сопла до стенки меньше, чем длина потенциального ядра струи ($H/D < 6$), процессы теплообмена более восприимчивы к влиянию гидродинамики струи, чем на больших расстояниях [8].

Использование развитых методов линейного управления ограничено для нелинейных турбулентных течений стабилизацией вблизи состояний равновесия, например для поддержания устойчивости системы локально в точке ламинарно-турбулентного перехода. При этом построение упрощённой дискретной линейной модели для текущей задачи управления теплообменом может быть выполнено с использованием методов OKID/ERA (Eigensystem realization algorithm/ Observer Kalman filter identification) понижения порядка динамической системы в сочетании с идентификацией систем путём записи отклика на псевдослучайный или импульсный сигнал управления [9].

Цель представленного исследования — анализ влияния параметров внешних возмущений расхода струи, которые могут дополнительно увеличивать или уменьшать локальные коэффициенты теплоотдачи при фиксированном расстоянии среза сопла от стенки $H/D = 2$. В данной работе возмущения расхода не ограничиваются только вынужденными синусоидальными колебаниями, реализован общий подход с автоматизированным поиском произвольных функциональных зависимостей как от времени, так и сигнала обратной связи от самого потока.

Экспериментальная установка. Схема экспериментальной установки со струйным гидродинамическим стендом представлена на рис. 1, *a* и описана в работе [10]. Турбулентный режим истечения струи задан числом Рейнольдса $Re = 4000$, построенным по средне-расходной скорости и выходному диаметру сопла $D = 15$ мм. На импактной поверхности устанавливался держатель датчика термоанемометра Dantec Dynamics MiniSTA 54T42 с волоконно-плёночным датчиком 55R14, который мог перемещаться ближе или дальше от стенки. Для того чтобы выдержать длительные периоды нагрева, вместо напыления 2–3 мкм слоя проводящего материала [11], который быстро деградирует вследствие элек-

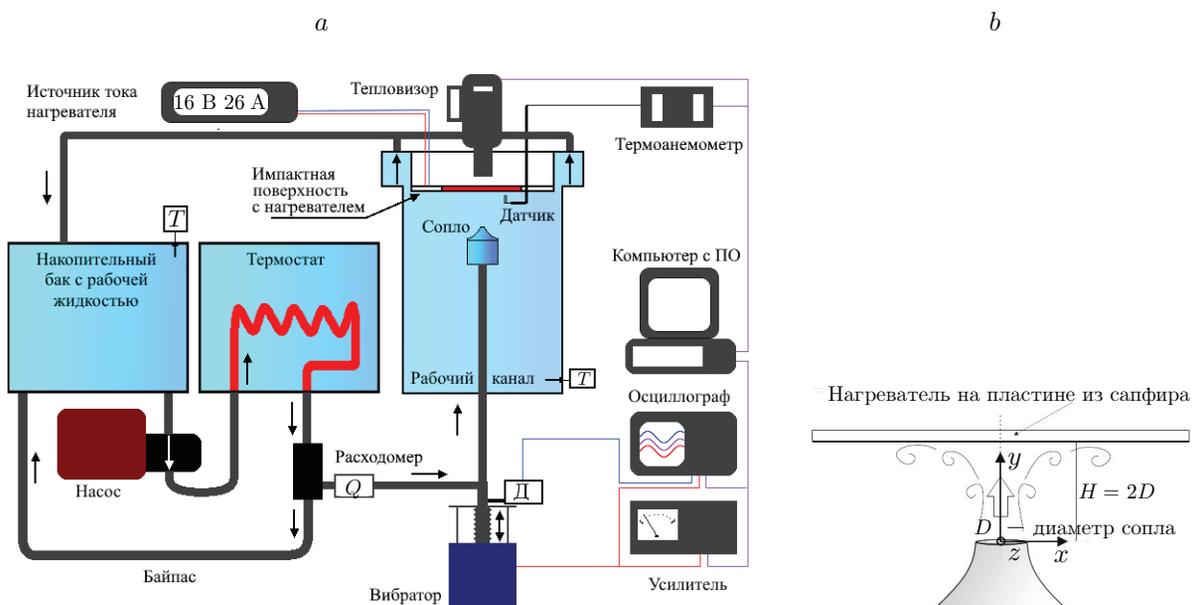


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки: *a* — фотография установки, *b* — схема области измерения

тролиза, на пластину из лейкосапфира $150 \times 100 \times 4$ мм наклеивались полосы нихромовой ленты Х20Н80 $20 \times 0,1$ мм и соединялись последовательно так, что площадь нагревателя составляла $144,42 \times 100$ мм, а его сопротивление — 0,38 Ом. Во время экспериментов программируемый источник тока GW INSTEK PSU7 60-25 поддерживал постоянную мощность нагрева 250 Вт. Для регистрации поля скорости методом PIV (Particle Image Velocimetry) [12] на интересующих режимах применялась скоростная цифровая камера Photron SA5 с размером кадра 1 Мпикс, на частоте 2 кГц фиксировалось перемещение полиамидных трассеров размером 20 мкм, подсвеченных непрерывным лазером мощностью 3 Вт. Область засветки в виде лазерного ножа толщиной 1 мм проходила по оси сопла, при этом снималась зона от края сопла до стенки по высоте и от оси струи до $x = 2D$ в радиальном направлении (рис. 1, b).

Описание метода. В целях постепенного увеличения сложности оптимизационных задач управления потоком в экспериментах со струей, натекающей на нагреваемую поверхность, сначала выполнялась параметрическая оптимизация синусоидального возмущения расходом жидкости без обратной связи $y(A, f, t) = A \sin(2\pi ft)$, где A — амплитуда, $y(A, f, t)$ — напряжение на выходе усилителя виброплатформы, f — частота возмущения. Затем применялась функциональная оптимизация законов управления с обратной связью от самого течения $y(s, t) = g(s, t)$, где g — произвольная суперпозиция функций и терминалов из заданных множеств $\Phi = \{+, -, *, \sin, \cos\}$ и $T = \{s, t, \text{const}\}$, где s — значение сигнала обратной связи, t — параметр времени и const — числовая константа.

Параметрическая оптимизация синусоидального возмущения. В первом случае для оптимизации применялась реализация классического генетического алгоритма, использованная в [13]. Данная процедура выполняет оптимизацию интегрального коэффициента теплообмена вблизи лобовой точки посредством контроля средней температуры в круге с радиусом $2D$ и центром в лобовой точке $\langle T_{2D} \rangle$.

Пример распределения параметров гармонических управляющих сигналов, полученных в результате оптимизации, приведён на рис. 2. Каждый сигнал из популяции фи-

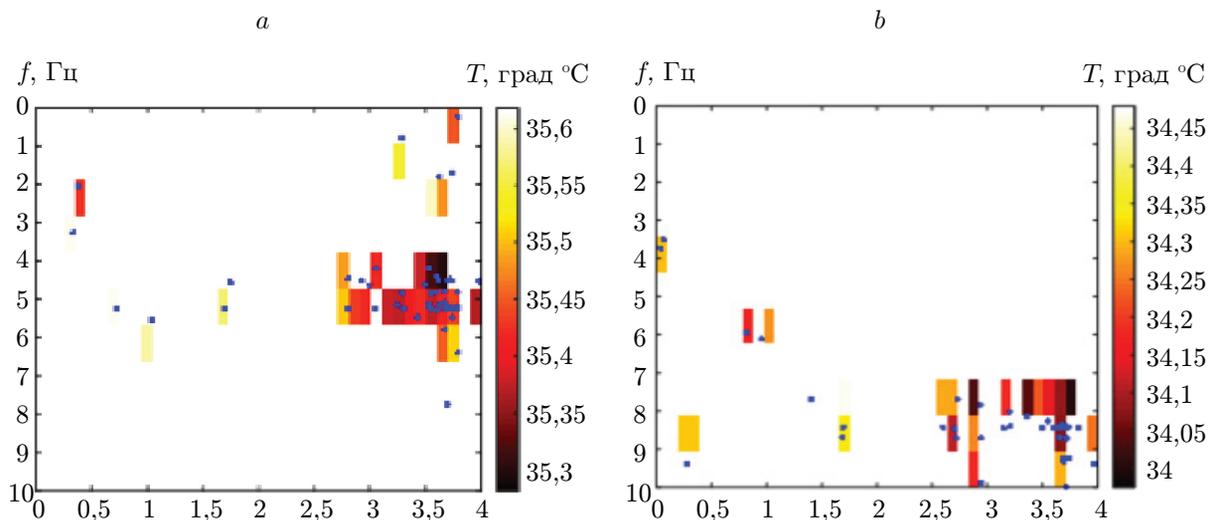


Рис. 2. Распределение частот и амплитуд управляющих гармонических сигналов среди поколения в конце оптимизации теплообмена со значениями температуры $\langle T_{2D} \rangle$ в окрестности лобовой точки: a — в случае с максимально возможной амплитудой $A_{\max} = 4$ В, b — с максимальной амплитудой, зависящей от частоты сигнала $A_{\max} = G(f)$

нального пятнадцатого поколения изображён точкой на плоскости с координатами $(A; f)$. Видно, что большинство сигналов группируется вблизи выделенных частот и максимальных амплитуд. На рис. 2, *a* максимально возможная амплитуда сигналов $A_{\max} = 4$ В не зависела от частоты и оптимальный сигнал имел параметры (3,6 В; 5,5 Гц), что соответствовало $St = 0,35$. На рис. 2, *b* неравномерность АЧХ вибратора учитывалась путём ограничения максимально возможных амплитуд сигналов для каждой конкретной частоты $A_{\max} = G(f)$, соответствующей уровню пульсаций на срезе сопла в 15 %. В этом случае параметры оптимального сигнала управления 3,7 В, 8,43 Гц.

Функциональная оптимизация регулятора с обратной связью. Помимо зависимости от времени t , в сигнал управления может подмешиваться сигнал обратной связи от текущего мгновенного значения модуля скорости потока вблизи стенки $y/D = 0,13$ (~ 2 мм) на расстоянии $2D$ от критической точки. Для этого была разработана другая система управления, реализованная также в среде LabVIEW, которая позволяет проигрывать пробные функции управления вибратором, заданные в виде набора текстовых строк, например, с математическими выражениями вида $y(s, t) = \cos((\cos(\cos(\sin(s - 2,841))) + 0,1977)(s - \cos(2,188t) + 14,86))$ путём их синтаксического разбора и далее непрерывного вычисления во время эксперимента подстановкой значений времени и напряжения с АЦП локального датчика скорости в соответствующие аргументы.

Струя жидкости с умеренным значением Re намеренно выбрана для экспериментов, чтобы использовать стандартные вычислительные системы нежёсткого реального времени. Стабильная длительность шага ввода/вывода АЦП/ЦАП, включающая в себя время вычисления значения управляющего сигнала в системе после предварительных тестов, выбрана равной 4 мс. Таким образом, с частотой 250 Гц по исходным данным вычисляется значение функции управления, которое затем преобразуется ЦАП в напряжение, усиливается и подаётся на виброкатушку электродинамического вибростенда, входящего в систему возмущения расходом.

Набор законов управления генерируется методом генетического программирования (ГП). В работе применялась реализация алгоритма ГП из специализированной библиотеки OpenMLC [9], которая выполняется в MATLAB и взаимодействует с системой управления на LabVIEW для тестирования набора сигналов в текущем поколении. В данном случае оптимизирующий код в MATLAB запускает систему управления и передаёт ей набор законов управления, принимает данные об эффективности их работы относительно выбранной цели оптимизации. В качестве функции приспособленности использовалась та же функция, что и для параметрической оптимизации.

В табл. 1 приведены ключевые параметры работы алгоритма ГП. Время проигрывания сигнала и время ожидания были такие же, как и для параметрической оптимизации.

Таблица 1

Параметры алгоритма ГП

Описание параметра	Значение параметра
Размер популяции сигналов, n	30
Количество поколений	≥ 10
Множество функций	{+, -, *, sin, cos}
Множество терминалов	{s, t, const}
Максимальная глубина дерева	15
Элитизм, N_e	2
Количество сигналов в турнире, N_p	7
Вероятность репликации, P_r	0,1
Вероятность скрещивания, P_c	0,5
Вероятность мутации, P_m	0,4

Таблица 2

Параметры проанализированных режимов течения

№	Режим	Параметры возмущения	Пульсации скорости на оси $y/D = 0,15$	Изменение $\langle T \rangle$, °C нагревателя в круге $r/D = 2$
1	Невозмущённый	—	3,7 %	0
2	Периодическое возмущение	$St = 0,6, A = 0,45 \text{ В}$	5,3 %	+0,4
3	Периодическое возмущение	$St = 0,6, A = 4 \text{ В}$	14 %	-0,3
4	Периодическое возмущение	$St = 0,35, A = 4 \text{ В}$	171 %	-1,48
5	Возмущение по сигналу ОС в положении $r/D = 1$	Закон управления	151 %	-1,56

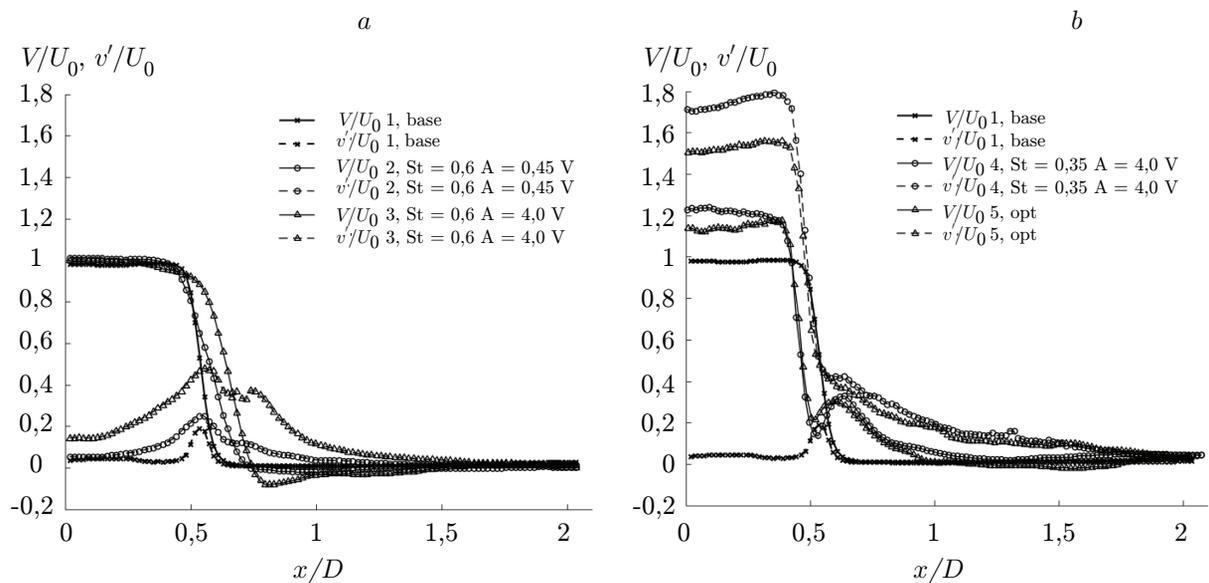


Рис. 3. Профили средней скорости и пульсаций скорости осевой компоненты на выходе из сопла $y/D = 0,15$: для струи с возмущениями (a) и пульсирующей струи в сравнении с невозмущённым случаем 1 (b)

Результаты и обсуждение. В данной работе рассмотрены характерные режимы течения с вынужденными периодическими синусоидальными возмущениями и режим с возмущением, вычисляемым по сигналу обратной связи (ОС), которые были получены путём эволюционной оптимизации средней температуры на стенке непосредственно во время эксперимента на струйном стенде [10].

В табл. 2 показаны параметры представленных в работе режимов течения. Их можно разделить на струю с возмущением (режимы 2 и 3) и пульсирующую струю (режимы 4 и 5). Такое деление связано с тем, что в пульсирующем режиме пульсации скорости достигали 171 %, а осевая компонента скорости на оси струи соответственно падала до $-0,1 \text{ м/с}$ в точке $y/D = 0,15$. При этом для пульсирующей струи эффект изменения теплообмена относительно базового случая охлаждения струёй без возмущения был более значительным. Интересно, что для струи с возмущением были найдены режимы с противоположным эффектом: увеличением и уменьшением средней температуры на стенке относительно базового случая. Для малых амплитуд возмущения наблюдалось ухудшение теплообмена (режим 2), а для больших (режим 3), наоборот, улучшение с небольшим снижением температуры на стенке.

Далее проанализируем распределение средних и пульсационных характеристик рассматриваемых течений. На рис. 3 показаны профили средней скорости и пульсаций скорости осевой компоненты v на расстоянии $y/D = 0,15$ от среза сопла в сравнении с невозмущённым режимом. Наблюдаются уровни пульсации скорости на оси струи, указанные в табл. 2. Также можно отметить изменение ширины ядра струи для струи с возмущениями. Для режима 3 наблюдается уширение профиля и потеря импульса в сдвиговом слое не такая значительная, как в режиме 2, что увеличивает дальность струи, поэтому большая часть импульса холодной струи достигает стенки.

На рис. 4 и 5 дополнительно представлено пространственное распределение модулей скорости для всех режимов и профилей радиальной компоненты скорости на различном расстоянии от стенки в сечениях $x/D = 1$ и 2. Видно, что для всех случаев с возмущением наблюдается более ранний отрыв по смещённому максимуму средней скорости от стенки, например в сечении $x/D = 1,5$. Причём этот ранний отрыв потока от стенки в режиме 3 коррелирует с улучшением теплообмена, в остальных случаях теплообмен ухудшается. Значит, помимо явления отрыва, могут действовать и другие механизмы в потоке, приводящие к изменению теплообмена на стенке. В данном случае для средних характеристик отличительной чертой режимов 4 и 5 является увеличенное значение средней скорости радиальной компоненты в области вдоль стенки вблизи $x/D = 1$. Таким образом, локальное превышение радиальной компоненты средней скорости по сравнению с базовым случаем, по-видимому, является дополнительным условием улучшения теплообмена за счёт увеличения массового расхода жидкости вблизи стенки, в том числе благодаря усилению эжекции и вовлечению окружающей жидкости в струю. Это демонстрируют отрицательные значения средней радиальной скорости при $y/D < 1,6$ для режимов 3, 4 и 5 (белые пунктирные линии на рис. 4 и 5) в отличие от базового случая и режима 2, где они всё ещё положительные в этой области. При этом образуется подобие канала между стенкой и областью течения выше пунктирной линии, увеличивающего дальность пристенной струи.

Первоначально поиск оптимальных сигналов для управления с ОС выполнялся исходя из предположения, что регистрация сигнала скорости в области отрыва потока на расстоянии $r/D = 2$ от критической точки и расстоянии $y/D = 0,1$ ($\sim 1,5$ мм) от стенки позволит определить предвестники событий, связанных с отрывом, и парировать их. Тем самым можно будет снизить или затянуть отрыв, чтобы он был менее выраженным или происходил дальше от критической точки. Однако добиться улучшения теплообмена данным способом, по сравнению с невозмущённым случаем, не удавалось, если специально не включать в состав первого поколения высокоамплитудные пульсации на частоте $St = 0,35$.

На основании анализа распределения средней скорости для эффективных периодических возмущений 3 и 4, снижающих температуру нагреваемой поверхности, была определена точка вблизи стенки на расстоянии $r/D = 1$, в которой модуль средней скорости возрос с уменьшением температуры.

Поэтому в следующей серии экспериментов именно там был размещён датчик термоанемометра для оптимизации управления с ОС в режиме 5 с предположением, что это поможет увеличить корреляцию между регистрируемой величиной локальной скорости и средней температурой на стенке при поиске вида оптимального регулятора.

Далее рассмотрим закон управления, полученный в финальном поколении для запуска обучения с целью снизить температуру на стенке:

$$y(s, t) = 25,82 - \cos(\cos(\sin(s)) - 0,666) - 37,77 \cos(\sin(s)). \quad (1)$$

Видно, что для данного закона прямой зависимости y от времени t получено не было. Пример зависимости для y и s этого закона от времени, а также их спектры показаны на рис. 6, а.

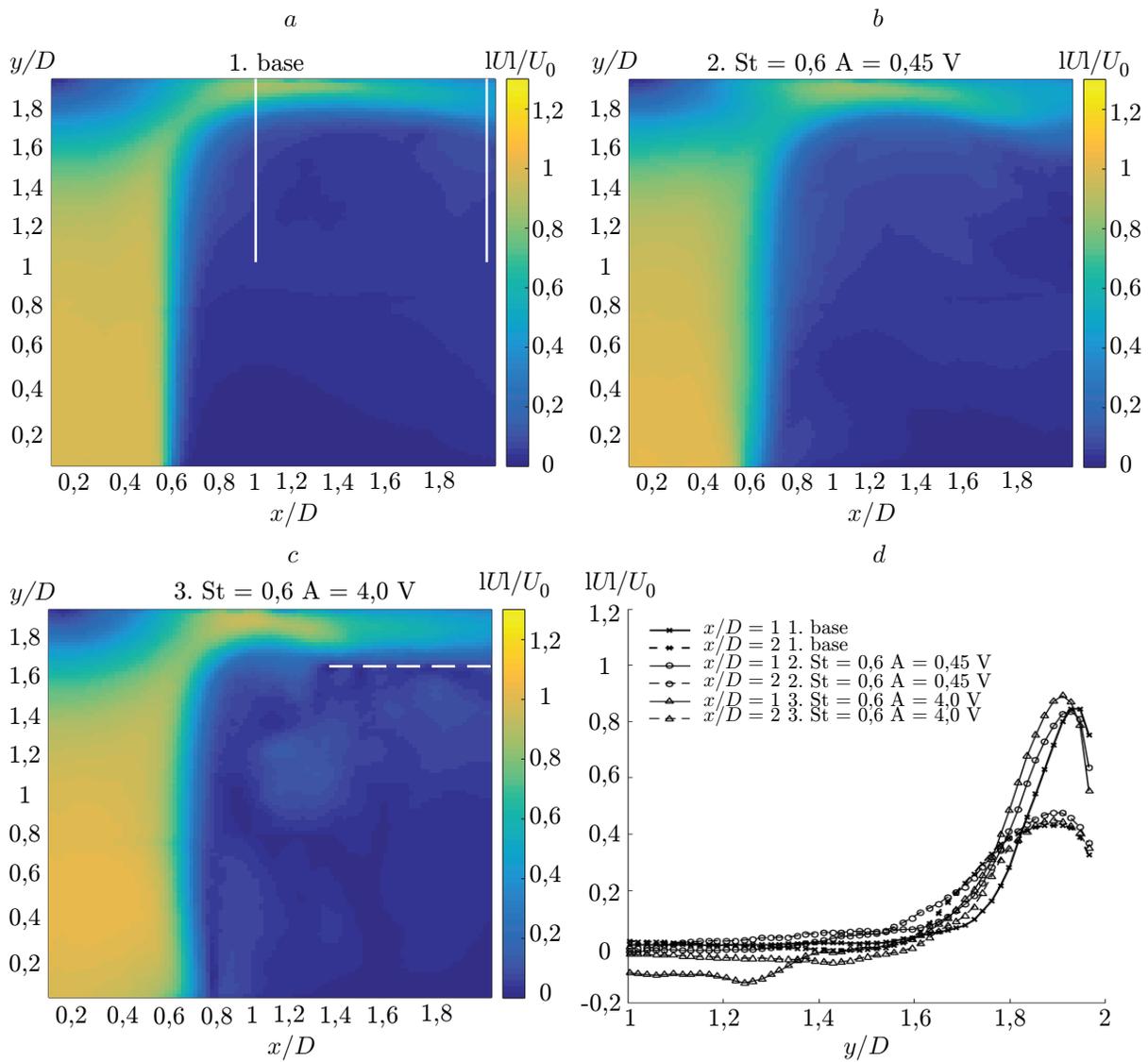


Рис. 4. Распределение модуля средней скорости: *a* — для невозмущённой струи и двух режимов струи с возмущениями (сплошными линиями обозначены области построения профилей на рис. 3–5), *b* — для режима 3, $St = 0,6$, $A=0,45$ В, *c* — для режима 4, $St = 0,6$, $A=4$ В, *d* — для профилей радиальной компоненты средней скорости в двух сечениях $x/D = 1$ и $x/D = 2$ случаев струи с возмущениями

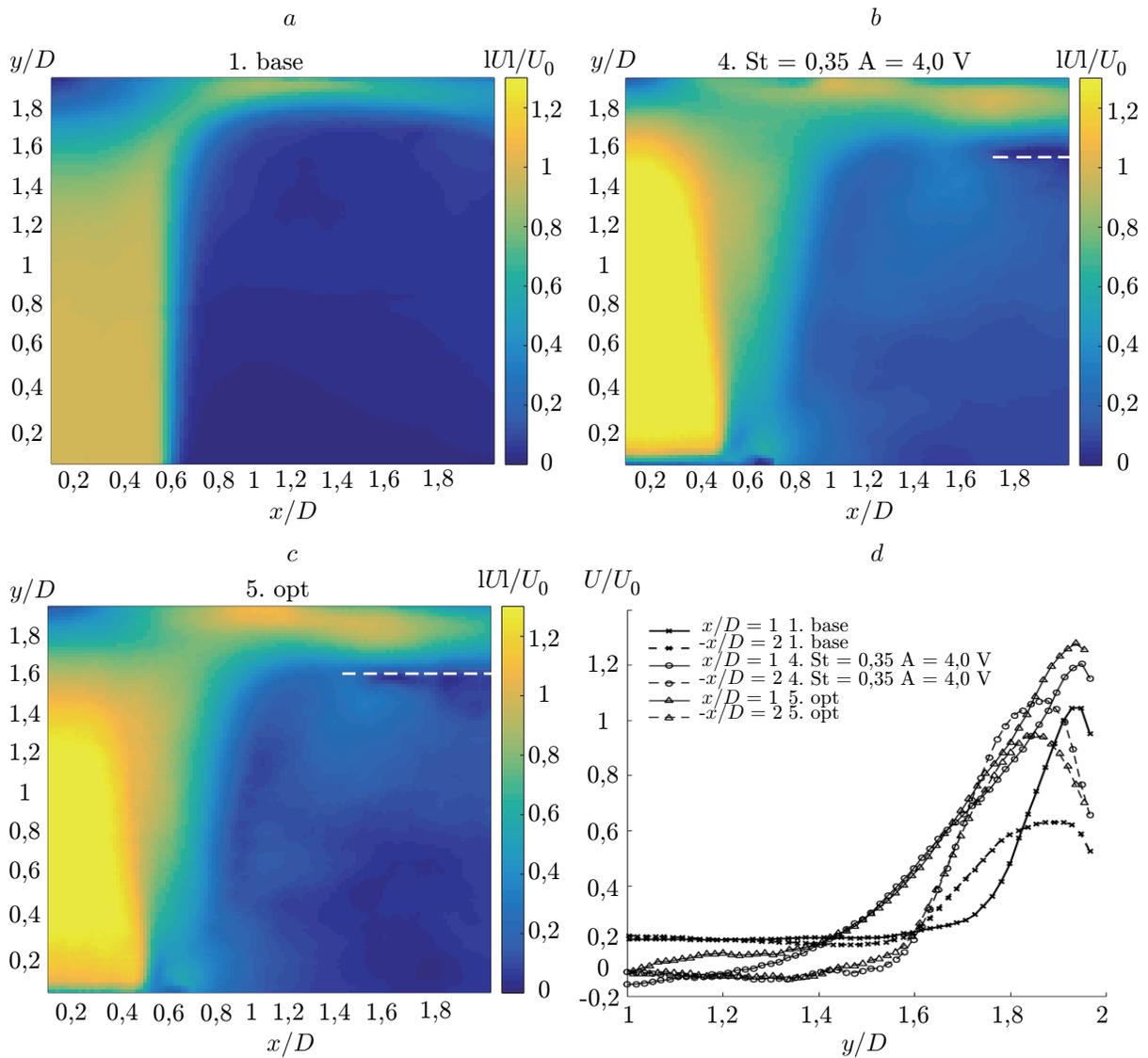


Рис. 5. Распределение модуля средней скорости: *a* — для невозмущённой струи и двух режимов с пульсирующей струёй, *b* — для режима 4, $St = 0,35$, $A = 4$ В, *c* — для режима 5, opt, *d* — для профилей радиальной компоненты средней скорости в двух сечениях $x/D = 1$ и $x/D = 2$ для случаев с пульсирующей струёй

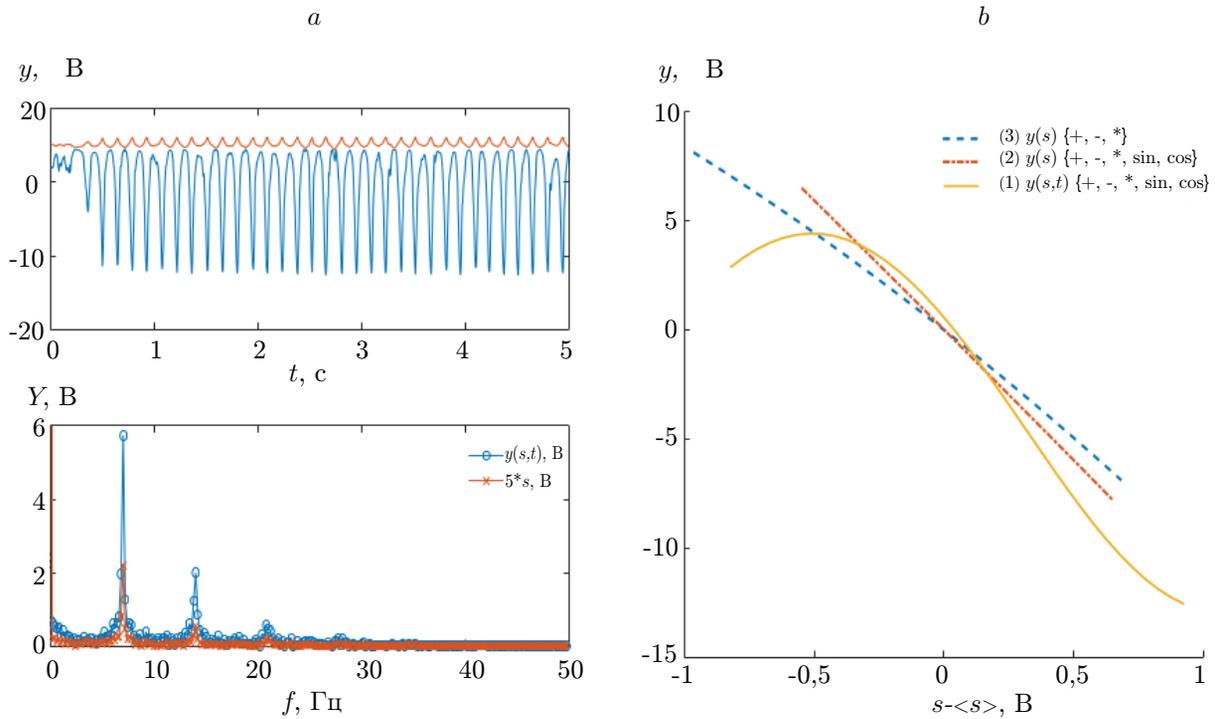


Рис. 6. Зависимости выходного сигнала: *a* — зависимости сигналов управления с ОС и с термоанемометра от времени и их частотный спектр (управление включается в момент времени $t = 0$), *b* — виды передаточных функций регуляторов с ОС, полученных в результате оптимизации теплообмена на стенке

Несмотря на это, после включения управления струёй в момент $t = 0$ в системе зарождаются периодические колебания, амплитуда которых экспоненциально увеличивается в течение 0,5 с, и далее они идут примерно на одной амплитуде. При этом система входит в режим автоколебаний, которые приводят к формированию пульсирующей струи с уровнем пульсаций скорости в ядре струи 151 % от величины среднерасходной скорости, как в режиме 4, с вынужденными колебаниями.

Пульсирующий режим позволяет улучшить отвод тепла с поверхности по сравнению с невозмущённой струёй. Причём, по-видимому, способ формирования пульсирующего режима для улучшения теплообмена на стенке за счёт вынужденных колебаний или автоколебаний не так важен, однако важны дополнительные преимущества, которые даёт тот или иной метод в разных ситуациях. Например, вынужденные колебания выгоднее использовать, когда среднерасходная скорость на выходе из сопла постоянна, тогда для возмущения можно применять генератор синусоидального сигнала фиксированной частоты. Однако для систем, где расход жидкости в струе может изменяться, удобнее использовать автоколебательный режим с датчиком ОС, так как он автоматически подстраивает частоту пульсаций расхода в струе, чтобы амплитуда пульсаций оставалась максимальной. Автоподстройка осуществляется за счёт уменьшения времени задержки в контуре ОС при увеличении конвективной скорости переноса возмущений.

Автоколебания затухают после выключения связи между сигналом с термоанемометра и сигналом на усилитель мощности виброкатушки. Частота колебаний для струи $Re = 4000$, определённая по спектру, была вблизи $f = 7$ Гц или $St = 0,37$. На спектрах сигналов s и y выделяются основная частота и её гармоники. Характерное время, соответствующее пикам локального увеличения скорости в области установки датчика, меньше времени релаксации между пиками во время снижения локальной скорости потока. Таким

образом, форма сигнала с датчика термоанемометра отличается от синусоидального. При этом максимумы скорости соответствуют минимумам расхода, и наоборот, минимумы скорости соответствуют максимуму расхода.

На рис. 6, *b* представлена передаточная характеристика регулятора с ОС, т. е. зависимость напряжения выходного сигнала регулятора y от напряжения сигнала с датчика скорости s в рабочем диапазоне напряжений для закона управления (1). Для удобства из сигнала с датчика вычиталось среднее значение за время тестирования закона управления. Центральную и верхнюю части диапазона можно аппроксимировать линейной зависимостью с отрицательной производной, что напоминает линейный закон управления с отрицательной ОС, однако начальная часть диапазона является нелинейной. В следующей оптимизации была удалена зависимость от времени t в генерируемых законах управления и был получен закон с похожей передаточной характеристикой:

$$y(s) = 0,7519 \sin(0,3439 \cos(s)) - 12,21s - 0,4485 \sin(0,5093 \cos(\cos(s)) \cos(s)) + \\ + 0,9902 \sin(0,6141 \cos(\cos(s)) \cos(s) \sin(s)) \sin(2,527 \cos(\cos(s))) - 0,1091. \quad (2)$$

После исключения гармонических функций $\{\sin, \cos\}$ из множества функций для генерации законов управления была получена следующая квадратичная функция управления:

$$y(s) = -s(s + 9,378). \quad (3)$$

Передаточные функции регуляторов (2) и (3), проходящие через точку $(0; 0)$ также отображены на рис. 6, *b* и лежат вблизи передаточной функции регулятора (1). Повторяемость результата оптимизации подтверждает оптимальность режима пульсирующей струи, полученной за счёт автоколебаний для эффективного охлаждения стенки при заданных условиях.

Заключение. В данной работе с использованием методов машинного обучения исследованы способы улучшения локального теплообмена на нагретой стенке, охлаждаемой однофазной турбулентной струей жидкости $Re = 4000$ с модуляцией расхода при расстоянии от края сопла до стенки $H/D = 2$. Управление течением осуществлялось в двух модификациях без обратной связи и с обратной связью. Контроль за эффективностью охлаждения выполнялся с использованием тепловизора. Поиск эффективных режимов возмущения расходом велся среди одноименных гармонических возмущений в режиме вынужденных колебаний без обратной связи и в виде суперпозиции заданного набора функций в режиме управления с обратной связью. Обратная связь осуществлялась по сигналу с датчика термоанемометра, расположенного вблизи стенки. Вычисление управляющего значения выходного сигнала для возмущения струи по сигналу обратной связи с локального датчика скорости осуществлялось с частотой 250 Гц.

Наиболее эффективное охлаждение на $1,48$ °С по сравнению с невозмущённой струей наблюдалось для режимов с максимальной амплитудой периодических возмущений расхода в струе, когда она находится в пульсирующем режиме и осевая компонента скорости на оси у кромки сопла падает до $-0,1U_0$, например, при $St = 0,35$ и $v'_c/U_0 \sim 1,71$. При ограничении уровня пульсаций на оси струи до 15 % частота оптимальных возмущений смещалась выше $St = 0,6$. При этом был выявлен противоположный эффект по модификации теплообмена на одной и той же частоте $St=0,6$: при уровне пульсаций 5,3 % средняя температура вблизи критической точки повышалась на $0,4$ °С а при уровне пульсаций 14 % снижалась на $0,3$ °С относительно невозмущённой струи. По-видимому, это связано с провоцированием отрыва потока на стенке в области $r/D = 2$ при наложении пульсаций и дальнейшим нивелированием влияния отрыва путём увеличения средней скорости потока в области $r/D = 1$ у стенки за счёт увеличения амплитуды возмущений.

В режиме управления с ОС положение датчика скорости на расстоянии $r/D = 2$ за область отрыва не позволяло улучшить теплообмен относительно базового случая

без возмущений. После перемещения датчика в позицию $r/D = 1$ искомые законы, улучшающие локальный теплообмен на стенке, стали определяться надёжно. Один из таких законов управления не имел явной зависимости от времени, однако устанавливал периодические пульсации в струе за счёт провоцирования автоколебаний расхода жидкости в струе посредством пропорционального регулятора с отрицательной обратной связью, который был обнаружен методом машинного обучения и по эффективности охлаждения стенки на $1,56^\circ\text{C}$ не уступал синусоидальным высокоамплитудным возмущениям. Была проверена воспроизводимость поиска такого закона управления в ситуациях зависимости регулируемого параметра от ОС и времени, а также только от сигнала обратной связи.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-08-01093) и в рамках государственного задания ИТ СО РАН в плане предоставления измерительного оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Белов И. А.** Взаимодействие неравномерных потоков с преградами. Л.: Машиностроение, 1983. 144 с.
2. **Gardon R.** Heat transfer between a flat plate and jets of air impinging on it // Proc. of the 2nd Int. Heat Transfer Conference (ASME). N. Y., 1962. P. 454–460.
3. **Gardon R., Akfirat J. C.** The role of turbulence in determining the heat-transfer characteristics of impinging jets // Int. Journ. Heat and Mass Transfer. 1965. **8**, Iss. 10. P. 1261–1272.
4. **Арбузов В. А., Арбузов Э. В., Дубнищев Ю. Н. и др.** Восстановление методами гильберт-оптики поля температуры при горении предварительно перемешанных пропановоздушных смесей // Автометрия. 2020. **56**, № 1. С. 74–82. DOI: 10.15372/AUT20200108.
5. **Violato D., Ianiro A., Cardone G., Scarano F.** Three-dimensional vortex dynamics and convective heat transfer in circular and chevron impinging jets // Int. Journ. Heat and Fluid Flow. 2012. **37**. P. 22–36.
6. **Hansen L. G., Webb B. W.** Air jet impingement heat transfer from modified surfaces // Int. Journ. Heat and Mass Transfer. 1993. **36**, Iss. 4. P. 989–997.
7. **Liu T., Sullivan J. P.** Heat transfer and flow structures in an excited circular impinging jet // Int. Journ. Heat and Mass Transfer. 1996. **39**, Iss. 17. P. 3695–3706.
8. **Carlomagno G. M., Ianiro A.** Thermo-fluid-dynamics of submerged jets impinging at short nozzle-to-plate distance: A review // Exp. Therm. and Fluid Sci. 2014. **58**. P. 15–35.
9. **Duriez T., Brunton S. L., Noack B. R.** Machine Learning Control-Taming Nonlinear Dynamics and Turbulence. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2017. P. 221.
10. **Tokarev M. P., Nichik M. Y., Gobyzov O. A. et al.** Study of the influence of an external flow rate perturbation on the vortex structure and heat transfer in impinging jets // Journ. Physics: Conf. Ser. 2021. **2057**, N 1. P. 012099.
11. **Суртаев А. С., Сердюков В. С., Моисеев М. И.** Применение высокоскоростной инфракрасной термографии для исследования кипения жидкости // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 4. С. 140–145.
12. **Алексеенко М. В., Бильский А. В., Дулин В. М. и др.** Диагностика струйных течений томографическим методом измерения скорости // Автометрия. 2014. **50**, № 5. С. 37–46.
13. **Minelli G., Tokarev M., Zhang J. et al.** Active aerodynamic control of a separated flow using streamwise synthetic jets // Flow, Turbulence and Combust. 2019. **103**, Iss. 4. P. 1039–1055.

Поступила в редакцию 17.01.2023

После доработки 30.05.2023

Принята к публикации 08.09.2023