

УДК 532.54  
DOI 10.17223/19988621/44/6

С.А. Филимонов, П.А. Необъявляющий, Е.И. Михиенкова

## ПРИМЕНЕНИЕ ГИБРИДНОГО АЛГОРИТМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ УДАЛЕНИЯ ВРЕДНЫХ ГАЗОВ АЛЮМИНИЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА<sup>1</sup>

Рассмотрена задача выравнивания расходов в системе удаления вредных газов из корпуса алюминиевого производства. Решение задачи осуществлялось при помощи гибридного 1D/3D-алгоритма, предназначенного для решения разномасштабных задач гидродинамики. Особенностью данного алгоритма, основанного на SIMPLE-процедуре, является единое уравнение на поправку давления для всей расчетной области. В результате расчета было определено гидравлическое сопротивление выравнивающих заслонок и общее разрежение в системе газоотделения для выравненного варианта.

**Ключевые слова:** численное моделирование, вычислительная гидродинамика, теория гидравлических цепей, гибридный 1D/3D-алгоритм, система газоудаления.

В современном мире численное моделирование играет ведущую роль в исследовании, проектировании и оптимизации различных технологических систем, а также отдельных устройств и механизмов. В сфере моделирования гидродинамических задач исторически сложились два основных относительно независимых подхода.

Первый подход – методы теории гидравлических цепей (ТГЦ) [1, 2], основанные на постулатах Кирхгофа и оперирующие интегральными балансами потоков. Геометрическое представление модели в таком подходе выполнено в виде ориентированно графа [3]. Методы ТГЦ позволяют рассчитать гидравлические, тепловые и массовые потоки в системах большой протяжённости (например, модель теплоснабжения города) при относительно небольших вычислительных затратах. Главным недостатком таких методов является сильная зависимость результата расчёта от эмпирических данных, например коэффициента местного гидравлического сопротивления, коэффициента телепередачи и так далее. Причём при изменении режима течения значение многих коэффициентов приходится пересчитывать.

Вторым подходом является применение методов вычислительной гидродинамики [4–7], при этом пространственные модели позволяют получить поля характеристик системы, распределённые по объёму исследуемого объекта. В основе данных методов лежит численное решение уравнений Навье – Стокса. Сильной стороной пространственного метода является меньшая зависимость модели от эмпирических данных, а основным недостатком – значительные вычислительные затраты.

Однако существует класс задач, в которых применение одного подхода либо невыгодно, либо невозможно. Под этот класс попадают модели систем, которые

<sup>1</sup> Работа выполнена при частичной поддержке проектов РФФИ и Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности.

одновременно состоят из протяжённых сетевых элементов (система кровеносных сосудов, тепловые трассы, русла рек и тому подобное) и пространственных элементов (например, разветвление аорты, сложные раздающие или собирающие устройства, дамбы и тому подобное). При этом сетевые элементы слишком длинные, чтобы их моделировать пространственными методами, а пространственные невозможно представить в виде набора ветвей. Для корректного расчёта процессов, протекающих в таких системах, стали строить гибридные или разномасштабные модели [8–12].

Существуют три основных вида гибридных моделей:

Полностью разделённая модель: пространственная и сетевая части рассчитываются по отдельности. В этом случае по результатам расчёта одной из частей определяют значения входных параметров для другой. Например, определение гидравлического сопротивления сложного пространственного элемента производится путём проведения численного эксперимента, а полученные значения используются в сетевой модели [13,14]. Основным недостатком такого метода является то, что при изменении входных условий возникает необходимость пересчитывать входные параметры заново.

Гидравлически единая модель: пространственная и сетевая части рассчитываются одновременно. Такой подход, по сравнению с предыдущим, удобен тем, что нет необходимости проведения ручного обмена данными, и при изменении граничных условий перерасчёт происходит автоматически. Основная проблема такого подхода – организация гидродинамической связи между двумя частями задачи.

Гидравлически не связанная модель: это модель, в которой сетевые элементы «пронизывают» пространственную часть и связь происходит по интегральным характеристикам стенки трубы/канала, например давлению [15] или тепловому потоку [16].

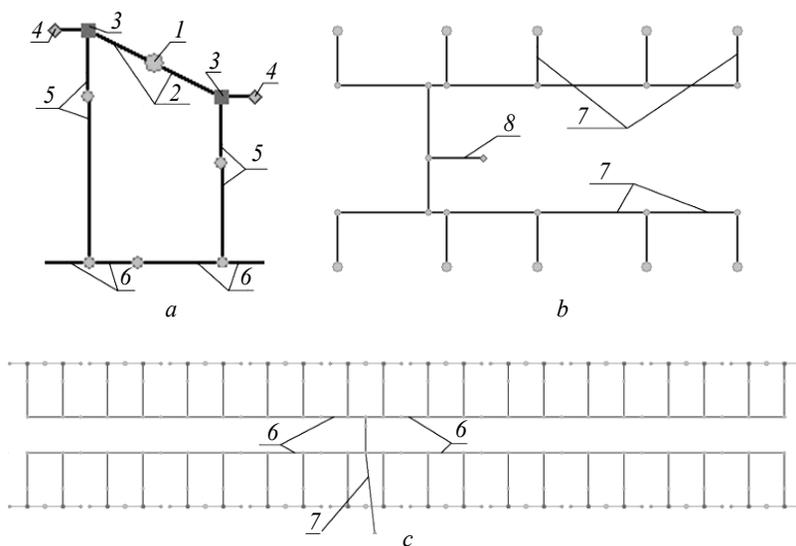
В данной работе приведён пример применения гибридной модели для оптимизации системы удаления вредных газов из электролизного корпуса алюминиевого завода (второй вид модели). Авторами предложен гибридный алгоритм, в котором связь между различными частями модели осуществляется за счёт построения единого уравнения для расчёта поля давления. Такой подход обеспечивает высокую сходимость по сравнению с традиционными методами решения гибридных задач, предполагающими раздельное решение пространственной и сетевой частей. Ранее был реализован алгоритм для ламинарных течений в микроканалах [17]. Для моделирования в системе удаления вредных газов была реализована возможность расчёта турбулентных режимов течения.

### Постановка задачи

В России на долю технологии Содерберга приходится около 85 % производимого алюминия. Данная технология характеризуется более низкой себестоимостью алюминия и более высокими, по сравнению с производством на обожженных анодах, удельными выбросами загрязняющих веществ. Высокие выбросы являются следствием того, что система сбора, эвакуации и очистки анодных газов не всегда обеспечивает их обезвреживание до уровня, определенного нормами предельно допустимых выбросов (ПДВ) и предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ. Также вместе с газообразными выбросами происходит и выброс пыли, которая помимо отравляющего действия приводит к зарастанию газозаходов и, как следствие, резкому ухудшению их работы. Для наиболее эффек-

тивной работы система удаления должна забирать газ от электролизной ванны в строго заданном диапазоне. При меньших объёмах забора анодные газы могут проникать непосредственно в пространство цеха, а при больших может произойти срыв пламени в устройствах дожигания (горелках). Система газоудаления представляет собой сильно разветвлённую сеть типа «дерево», что приводит к задаче выравнивания расхода по всем её уровням.

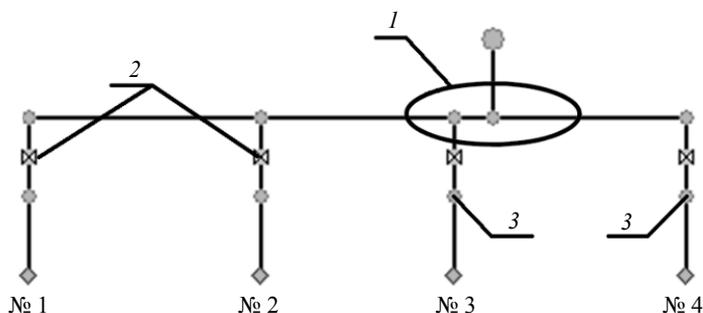
На рис. 1 показана топологическая схема системы газопроводов электролизного корпуса алюминиевого производства, в которой можно выделить несколько подуровней. Обвязка электролизной ванны (рис. 1, а): в процессе электролиза выделяются анодные газы (1), которые собираются газосборным куполом (2). В горелках (3), обычно расположенных по углам электролизной ванны, происходит смешение с воздухом (4) и сжигание горючих анодных газов и смолистых веществ. Затем продукты сгорания по опускным газопроводам (5) отводятся под корпус, где попадают в подкорпусные газопроводы (6). Соединённые одним подкорпусным газопроводом ванны образуют бригаду (рис. 1,с). От всех бригад корпуса по выносным газопроводам (7) вредные газы выводятся за его пределы, после этого собираются выносными газопроводами (7) в один и поступают в систему газоочистки (8). Обычно одна очистная установка обслуживает 2 корпуса (рис. 1, б).



**Рис. 1.** Система газопроводов электролизной серии: а – обвязка электролизной ванны: 1 – источник анодных газов, 2 – газосборный колокол, 3 – горелка, 4 – подача воздуха в горелку, 5 – опускные газопроводы, 6 – подкорпусной газопровод; б – бригада электролизных ванн: 6 – система подкорпусных газопроводов переменного сечения, 7 – выносной газопровод; в – система выносных газопроводов: 7 – выносные газопроводы от двух корпусов, 8 – общий газопровод в систему очистки и дымовую трубу

**Fig. 1.** System of the gas ducts of a potline: а) the electrolysis bath piping: 1, the source of anode gas; 2, gas-gathering tank; 3, burner; 4, air supply into the burner; 5, downtaking ducts; and 6, gas duct under the building. б) The group of electrolysis baths: 6, system of ducts with a variable cross-section under the buildings, and 7, remote gas duct. в) System of the remote gas ducts: 7, the remote gas ducts of two buildings, and 8, a general gas duct directed to the purification system and smoke stack

Предприятия российской алюминиевой промышленности регулярно проводят работы по уменьшению концентрации анодного газа внутри корпусов и общему сокращению вредных выбросов в атмосферу [18–21]. Одной из таких работ была модернизация узла сбора анодных газов от нескольких корпусов Красноярского алюминиевого завода на примере 19-го корпуса. Основной целью работы было определение возможности регулирования расходов от каждой бригады корпуса, исходя из условия, что расход от одной ванны находится в диапазоне от 800 до 900 м<sup>3</sup>/ч. Электролизные ванны 19-го корпуса разделены на четыре бригады (см. рис. 2). На каждую бригаду приходится разное количество ванн: 1-я и 2-я бригады – 24 ванны, 3-я бригада – 26 ванн и 4-я – 20 ванн. Выравнивание расходов предполагается осуществить с помощью регулирующих заслонок.

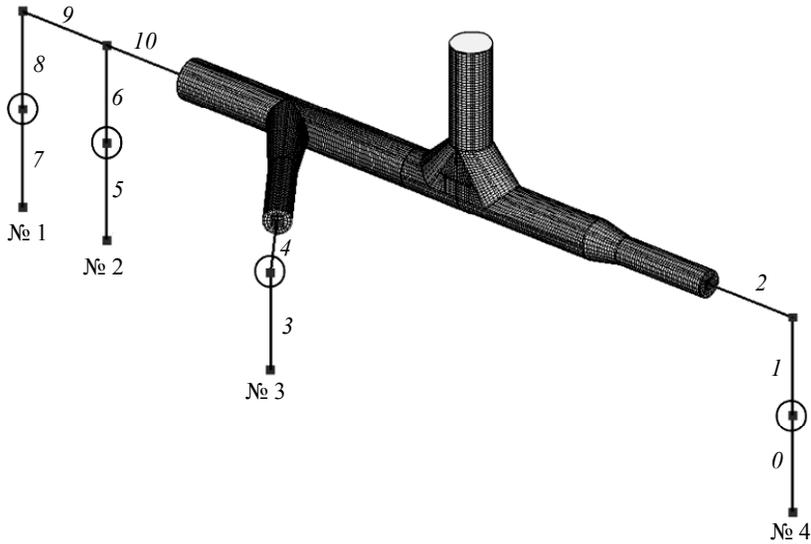


**Рис. 2.** Система выносных газоходов бригад 19-го корпуса: № 1–4 – номера бригад, 1 – сборный коллектор, 2 – регулирующие заслонки, 3 – точки замера

**Fig. 2.** System of the remote gas ducts of the groups of the 19th building:

1–4 are the numbers of groups; 1, gathering manifold; 2, control damper; and 3, gage points

Главной особенностью данного выносного газохода является наличие центрального сборного коллектора (пространственная часть представлена на рис. 3), потери давления в котором составляют примерно половину от общей потери давления в исследуемой части системы. В общем случае моделирование такой задачи в рамках одного из основных подходов (полностью 3D или полностью ТГЦ) невозможно. Размер расчётной сетки для построения полностью пространственной модели всего корпуса будет слишком велик, так как длины некоторых участков больше 100 м, также при таком подходе невозможно представить бригаду эквивалентным элементом. В то же время, при построении полностью сетевой модели необходимо определить гидравлическое сопротивление коллектора для разных режимов его работы, что также является достаточно трудоемкой задачей. Конструктивные элементы (отвод от третьей бригады, сборный тройник и диффузор) находятся слишком близко (3 – 5 калибров) и оказывают влияние друг на друга, что делает невозможным расчет их гидравлического сопротивления по справочным данным. Применение разделённой модели для определения гидравлического сопротивления каждого отвода коллектора также не подходит, так как есть предположение, что до и после выравнивания расходов оно будет сильно отличаться. Построение гибридной модели позволяет устранить эти недочеты: протяженные элементы представлены в виде сети, сборный коллектор – в виде пространственного элемента (см. рис. 3), а сопротивление коллектора будет рассчитано для конкретных величин расходов.



**Рис. 3.** Гибридная модель системы выносных газоходов 19-го корпуса:  
 № 1 – 4 номера бригад, 0–10 – номера ветвей, кругом выделены точки замеров  
**Fig. 3.** Hybrid model of the system of remote gas ducts of the 19th building:  
 1–4 are the numbers of groups, 0–10 are the numbers of branches;  
 the circles indicate the gage points

### Математическая модель

Реализация предложенного в работе гибридного алгоритма выполнена на базе программного пакета SigmaFlow [22–24], предназначенного для решения широкого спектра задач гидродинамики. Авторы статьи расширили функционал данного пакета на решение сетевых и гибридных задач [16, 17, 25].

Суть методики следующая. Исходная задача разбивается на пространственную и сетевую части, взаимодействие между которыми осуществляется на основе решения общего уравнения на поправку давления.

Для дискретизации уравнений гидродинамики в пространственной области применяется метод контрольного объема, используется неструктурированная сетка из гексаэдральных ячеек, значения искомых переменных определяются в центрах контрольных объемов. Значения величин на гранях контрольных объемов определяются в зависимости от схемы аппроксимации. Течение среды в пространственной части описывается уравнениями Рейнольдса:

$$\nabla(\rho \mathbf{v}) = 0; \quad (1)$$

$$\nabla(\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau}^m + \boldsymbol{\tau}^t), \quad (2)$$

где  $p$  – давление,  $\mathbf{v}$  – вектор скорости,  $\rho$  – плотность,  $\boldsymbol{\tau}^m$  – тензор вязких напряжений и  $\boldsymbol{\tau}^t$  – тензор турбулентных напряжений Рейнольдса:

$$\tau_{ij}^m = \mu \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right),$$

$$\tau_{ij}^t = \mu_t \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k,$$

где  $v_i$  – компоненты вектора скорости,  $\mu$  и  $\mu_t$  – молекулярная и турбулентная вязкость жидкости,  $k$  – удельная кинетическая энергия турбулентных пульсаций. Для замыкания уравнений при турбулентном режиме течения использовалась модель  $k-\omega$  SST [26]. Граничные условия для турбулентных характеристик на границе двух частей задач заданы исходя из условий Неймана.

Закон сохранения энергии для пространственной части задачи:

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v} h) = \nabla (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{Pr_t} \nabla h \right), \quad (3)$$

где  $h$  – энтальпия,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $T$  – температура,  $\mu_t$  – турбулентная вязкость,  $Pr_t$  – турбулентное число Прандтля.

Для описания сетевой части задачи используются методы ТГЦ [1, 2]. Гидравлическая цепь состоит из набора узлов ( $N$ ) и ветвей ( $U$ ), представляющих собой ориентированный граф, матрица связей которого представляется в виде

$$D_{il} = \begin{cases} 1, & \text{если } l \in O_i \\ -1, & \text{если } l \in I_i, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (4)$$

Здесь  $l$  – номер ветви,  $l \in O_i$  – множество ветвей, исходящих из  $i$ -го узла,  $l \in I_i$  – множество ветвей, входящих в  $i$ -й узел. Используя выражение (4), задачу потоко-распределения в сети можно свести к сочетанию закона сохранения массы в узле и закона сопротивления в трубе:

$$\sum_{l \in U_i} D_{il} q_l = Q_i, i \in N, \quad (5)$$

$$s_l |q_l| q_l = \sum_{i \in N} D_{il} p_{Di} + h_l, l \in U, \quad (6)$$

где  $q_l$  – массовый поток на ветви,  $Q_i$  – источник массы, существующий в узле,  $p_{Di}$  – давление в узле,  $h_l$  – дополнительный напор ветви,  $s_l$  – коэффициент сопротивления, определяемый по следующей формуле:

$$s_l = \left( \xi + \frac{\lambda \cdot l}{d} \right) \frac{1}{2 \cdot \rho \cdot f^2},$$

где  $\lambda$  – коэффициент линейного трения,  $d$  – гидравлический диаметр ветви,  $l$  – длина ветви,  $f$  – площадь сечения трубы,  $\xi$  – коэффициент местного сопротивления.

Уравнение энергии для сетевой части задачи представлено в виде

$$h_i \sum_O (q_O) = \sum_I (q_I h_I) + Q_i h_q + S_{h_{-i}}, \quad (7)$$

Здесь  $h_i$  – энтальпия в  $i$ -м узле,  $O$  – множество узлов, по которым поток расходится от  $i$ -го узла,  $I$  – множество ветвей, по которым поток приходит в  $i$ -й узел,  $h_q$  – энтальпия источника массы,  $S_{h_{-i}}$  – тепловой источник (сток) в  $i$ -м узле.

Взаимосвязь поля скорости и давления в пространственной части осуществляется при помощи SIMPLE-подобной процедуры [4]. Для ТГЦ-части задачи SIMPLE-подобный алгоритм был адаптирован следующим образом.

На первом этапе решаем линеаризованное уравнение на расход в трубе (6) и получаем приближенное значение расхода на ветвях:

$$s_l |q_l^{k-1}| q_l^k = \sum_{i \in N} D_{il} p_{Di}^k + h_l, l \in U, \quad (8)$$

где  $k$  – номер итерации. Найденные на первом этапе величины расходов, в общем случае, не удовлетворяют уравнению неразрывности. Для его соблюдения выполняется коррекция, в процессе которой решается уравнение на поправку давления  $p'$  и определяется давление на следующей итерации.

$$\sum_{l \in U} D_{jl} \left( \tau_{br} \cdot \sum_{i \in N} D_{il} p'_{Di} \right) = q_j - \sum_{l \in U} D_{jl} q_l^k, j \in N, \quad (9)$$

где  $\tau_{br}$  – коэффициент, равный

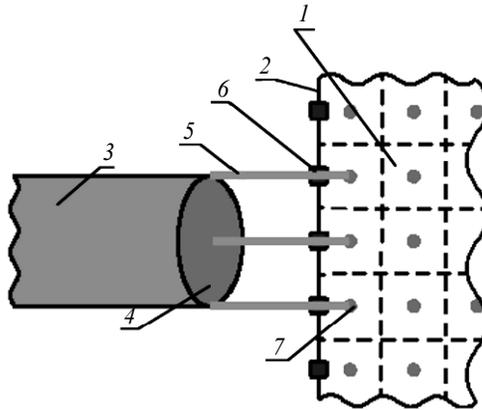
$$\tau_{br} = \frac{1}{s_l |q_l^k|},$$

В правой части уравнений (9) записан баланс расхода для данного контрольного объема или сумма расходов на ветвях, входящих в  $i$ -й узел и исходящих из него. Следующий этап – это получение новых значений давления в узлах

$$p^{k+1} = p^k + p', \quad (10)$$

где  $p^k$  и  $p^{k+1}$  – значения давления на предыдущей и текущей итерации.

Механизм объединения двух частей задачи осуществляется при помощи стыковочных ветвей (см. рис. 4).



**Рис. 4.** Механизм объединения двух частей задачи: 1 – пространственная часть задачи, 2 – граница пространственной области, 3 и 4 – ветвь и узел сетевой части задачи, 5 – стыковочная ветвь, 6 – стыковочная грань, 7 – стыковочный контрольный объем

**Fig. 4.** The process of unification of two parts of the problem: 1, a spatial part of the problem; 2, a boundary of the spatial domain; 3–4, the branch and the node of a network part of the problem, respectively; 5, coupling branch; 6, coupling line; and 7, docking control volume

После расчёта приближенных значений скорости (2) и расхода (6) в разных частях задачи происходит процедура осреднения расхода через стыковочную ветвь 3 и входную границу пространственной области 2 (рис. 4). Для этого от стыковочного узла 4 в каждый граничный контрольный объем пространственной области 5 строится стыковочная ветвь с минимальным гидравлическим сопротивлением

$$q_{\text{branch}(i)} = q_{\text{interface}(i)}^* \frac{Q_{\text{net}}^* + Q_{\text{cfd}}^*}{2} \cdot \frac{1}{Q_{\text{cfd}}^*}, \quad (11)$$

Здесь  $q_{\text{branch}(i)}$  – расход по стыковочной ветви,  $q_{\text{interface}(i)}^*$  – расход через стыковочную грань пространственной области (поз. 6 на рис. 4),  $Q_{\text{net}}^*$  – расход по стыковочной ветви, полученный в результате расчёта уравнения (6),  $Q_{\text{cfd}}^*$  – суммарный расход через стыковочные грани – из уравнения (2). Такой подход позволяет сохранить профиль скорости на границе пространственной области, что исключает из результатов решения потерю давления на восстановление формы потока после ударного профиля. Полученный расход  $q_{\text{branch}(i)}$  переходит в правую часть уравнения на поправку давления как для стыковочного узла, так и для каждого граничного контрольного объёма. После решения уравнений на поправку давления на стыковочных гранях задаётся среднее значение поправки давления

$$p'_{\text{interface}(i)} = \frac{p'_{\text{net}(i)} + p'_{\text{cfd}(i)}}{2}. \quad (12)$$

Таким образом, предложенный алгоритм имеет вид:

1. Вычисление приближённого значения скорости (2) и расхода (6).
2. Интерполяция расходов между сетевой и пространственной частями (11).
3. Расчет уравнений на поправку давления в пространственной и ТГЦ-частях (9).
4. Задание поправки давления на стыковочных гранях (12).
5. Коррекция скорости в пространственной части.
6. Определение нового поля давления.
7. Решение уравнений модели турбулентности в пространственной подмодели.
8. Проверка критериев сходимости задачи и, при необходимости, запуск следующей итерации с первого пункта.

## Результаты

Для определения текущего состояния системы, а также корректного задания параметров и верификации гибридной модели, был проведен ряд замеров на выходе выносных газоходов бригад из-под корпуса. Для измерения статического давления  $p$  и динамического напора  $\Delta p$  в газоходах использовался дифференциальный манометр цифровой ДМЦ-01М с трубкой НИИОГАЗ и автоматической температурной коррекцией, температуры газов измерялись хромель-алюмелевой термопарой. Замеры проводились согласно общепринятым методикам [27] на прямых участках газоходных трактов после выхода их из-под корпуса. Для корректного сопоставления результатов объем удаляемых газов приводился к нормальным условиям (0 С; 101,3 кПа). Результаты замеров представлены в табл. 1.

По приведённым в табл. 1 данным бригады можно приближённо представить в виде ветви минимальной длины с заданным коэффициентом местного сопротивления, который определялся по формуле

Таблица 1

## Результаты замеров сборных газоходов бригад

Точка замера	$\Delta p$ , Па	$p$ , Па	$T$ , °С	$w$ , м/с	$Q$ , тыс м <sup>3</sup> /час (при ст.у.)
1-я бригада	129.3	590.0	94.0	12.6	16.1
2-я бригада	214.0	988.0	101.0	16.4	20.6
3-я бригада	454.3	1542.0	110.0	24.1	29.6
4-я бригада	156.5	1050.0	127.0	14.5	17.0

$$\xi_i = \frac{2 \cdot p_i}{\rho \cdot w_i^2}, \quad (9)$$

Здесь  $i$  – номер бригады,  $p_i$  – полное давление на выходе из нее,  $\rho$  – плотность газа,  $w_i$  – скорость газа на выходе из этой бригады. Из-за большого избытка воздуха в горелках [18] и его присосов в тракте подкорпусных газоходов, свойства газа сопоставимы со свойствами воздуха. Тогда плотность газа принимается как для воздуха со средней температурой 108 °С –  $\rho = 0,923$  кг/м<sup>3</sup>. После определения  $\xi_i$  переходим к заданию параметров на остальных ветвях модели. Сетевые элементы гибридной модели можно разбить на три группы:

1. Ветви, параметры которых задаются исходя из геометрических характеристик (ветви 2, 9, 10).

2. Ветви, моделирующие область, где будет находиться регулирующая заслонка (ветви 1, 4, 6, 8). Минимальная длина и сопротивление соответствуют открытой заслонке.

3. Ветви, описывающие бригаду подкорпусного газохода (ветви 0, 3, 5, 7). Способ определения их параметров описан ниже.

В табл. 2 приведены основные параметры сетевых элементов гибридной модели, шероховатость поверхности труб задавалась равной 1мм согласно справочным данным [28]. Пространственная часть задачи разбита на 85 тыс. гексагональных ячеек (см. рис. 3). Была проведена проверка сетки на насыщение: при сетке 230000 ячеек отличие от модели с грубой сеткой по перепаду давления в пространственной части составило менее ~4 %.

Для расчёта были заданы следующие граничные условия: в крайних узлах сетевых элементов (узлы 1, 5, 8 и 11) задано условие фиксированного избыточного давления – 0 Па, а на выходе – суммарный расход 85000 м<sup>3</sup>/ч.

Таблица 2

## Параметры сетевых элементов гибридной модели

№ ветви	№ группы	Диаметр, м	Длина, м	Кэф. местного гидравлического сопротивления
0	3	0.82	1	11.37
1	2	0.82	1	0.34
2	1	0.82	135	1.61
3	3	0.82	1	5.75
4	2	0.82	1	0.34
5	3	0.82	1	7.83
6	2	0.82	1	0.34
7	3	0.82	1	7.73
8	2	0.82	1	0.34
9	1	0.82	149	1.63
10	1	1.22	171	4.1

На рис. 5 показано сравнение расходов в расчёте и эксперименте. Максимальное отклонение наблюдается для четвертой бригады и составляет примерно 6 %, что меньше требуемой основной погрешности средств измерения объемного расхода газов на  $\pm 10\%$  (см. РД 52.04.59-85 [29]). Разрежение на выходе из коллектора равно 2416 Па.

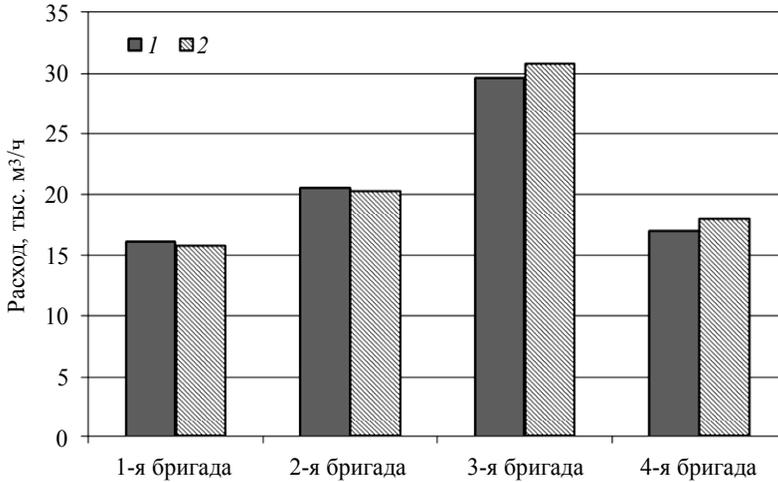


Рис. 5. Сравнение расчётных расходов по бригадам с данными эксперимента: 1 – результаты эксперимента, 2 – результаты расчёта

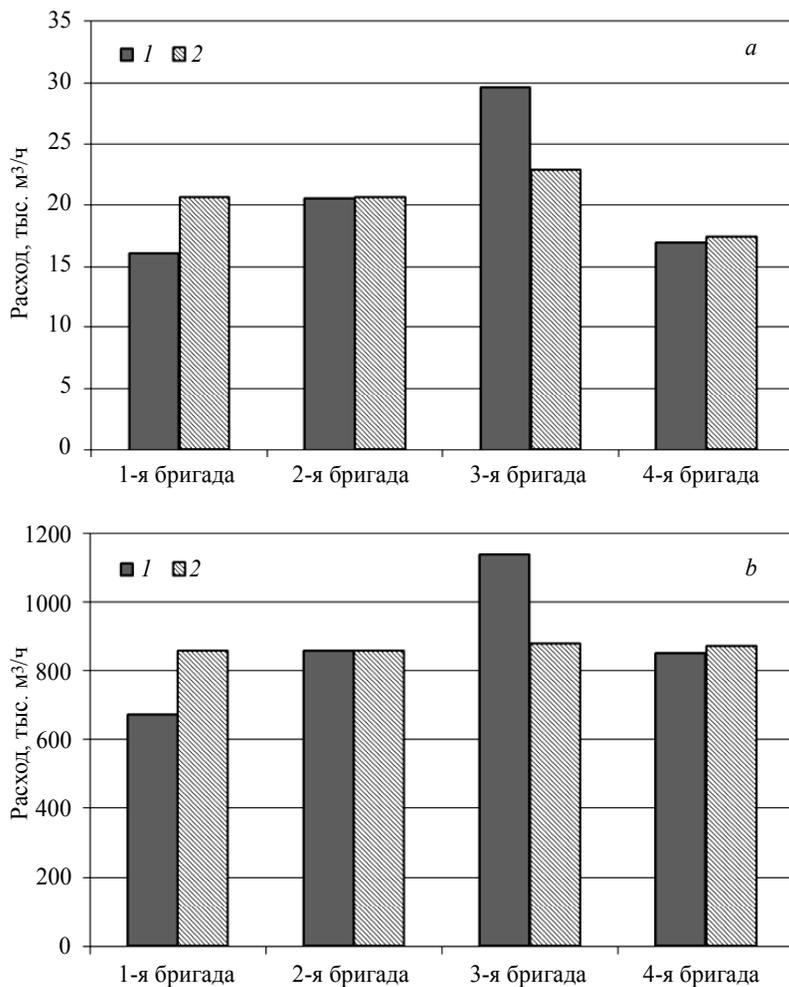
Fig. 5. Comparison of the predicted flow rates with experimental data for every group: 1, experimental results and 2, calculation data

После подтверждения корректности модели была решена задача о выравнивании расходов. Так как выравнивание предполагается осуществлять при помощи регулирующих заслонок, то задача сводится к определению сопротивления заслонок для выравнивания расходов и оценке изменения общего разрежения в системе. Для определения дополнительного сопротивления граничные условия в модели были изменены: в граничных узлах (бригадах) был задан расход, соответствующий среднему расходу на ванну ( $850 \text{ м}^3/\text{ч}$ ), а на выходе было задано условие фиксированного давления. По разнице между максимальным давлением в одном граничном узле и давлением в других граничных узлах определяется избыток давления, который надо компенсировать заслонкой. Результаты расчёта представлены на рис. 6 и в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчёта и значение сопротивления заслонок

Номер бригады	Расход, $\text{м}^3/\text{ч}$ (при ст.у.)	Давление в граничном узле, Па	Избыточное давление, Па	Средняя скорость, м/с	Добавочное сопротивление
1-я бригада	20.4	2883	0	16.11	0
2-я бригада	20.4	2208	675	16.11	5.5
3-я бригада	22.1	1415	1468	17.5	10.1
4-я бригада	17	1985	898	13.4	10.6



**Рис. 6.** Распределение расходов по бригадам 19 корпуса: 1 – до выравнивания, 2 – после выравнивания; а – по бригаде в целом, б – приведено к одной ванне

**Fig. 6.** Distribution of the flow rates among the groups of the 19th building:

1, before and 2, after the flow balance; а) for the whole group and б) for one bath

На рис. 6, а показано распределение расходов по бригадам до и после выравнивания. Как видно из данного рисунка, от каждой бригады отбирается разное количество газа, однако если отбираемый от бригады расход газа привести к количеству ванн в бригаде, то видно, что во всех бригадах у каждой ванны отбирается одинаковое количество газа (рис. 6, б). Задав нужное сопротивление на ветви, имитирующее заслонки и вернув прежние граничные условия, провели контрольный расчёт, результаты которого показали совпадение с требуемыми расходами с точностью до 2 %. При этом разрежение на выходе из коллектора выросло с 2416 до 2868 Па, то есть на 20 %. В связи с этим, перед принятием решения о выравнивании расходов нужно убедиться в достаточной мощности дымососов.

После задачи выравнивания была проведена проверка изменения гидравлического сопротивления для каждого отвода. Для этого был проведён расчёт сопротивления для каждого отвода до и после выравнивания:

$$\xi_i = \frac{2\Delta p_i}{\rho_i w_i^2}. \quad (10)$$

Здесь  $i$  – номер входа коллектора,  $\Delta p_i$  – перепад полного давления между  $i$ -м входом в коллектор и выходом из него. Результат расчёта представлен в табл. 4.

Таблица 4

**Гидравлическое сопротивление отводов коллектора  
до и после выравнивания расходов газа**

Вариант	Сопротивление отводов коллектора		
	1-я, 2-я	3-я	4-я
до	8.9	2.1	15.1
после	8.2	4.4	9.5

Как видно из данной таблицы, для двух отводов бригад (3-я и 4-я) сопротивление отводов изменилось в два раза. Следовательно, процедуру определения гидравлического сопротивления отводов коллектора и их переноса в сетевую модель пришлось бы производить неоднократно, что нивелирует преимущество быстрого счета сетевой модели.

### Заключение

Представлено применение гибридной модели для выравнивания расходов газа в выносных газопроводах бригад электролизных ванн 19-го корпуса Красноярского алюминиевого завода. Сравнение результатов расчёта с экспериментальными данными доказало корректность построенной модели.

На основании полученной модели было определено гидравлическое сопротивление, которое необходимо выставить регулируемыми заслонками на отводе от каждой бригады. Также расчёт показал, что по сравнению с текущей ситуацией, для выровненной схемы разрежение в системе необходимо повысить на 20 %.

До проведения расчётов было выдвинуто предположение о невозможности расчёта данной задачи только методами пространственного моделирования. Помимо слишком большого количества ячеек в сетке (для решения протяженных участков газопроводов), в пространственной модели представление бригады в виде отдельного элемента с заслонкой неизвестной геометрии вызывает определенные трудности.

После решения задачи о выравнивании расходов газа была проведена проверка возможности решения такой задачи при помощи разделённой гибридной модели. Для этого было проведено сравнение гидравлического сопротивления на отводах бригад до и после выравнивания. Результат проверки показал, что на двух отводах произошло изменение сопротивления почти в 2 раза. Следовательно, однократный перенос значений гидравлического сопротивления может привести к существенным погрешностям при расчёте.

На основании вышесказанного был сделан вывод о применимости данного алгоритма для моделирования такого класса задач.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Хасилев В.Я., Меренков А.П. Теория гидравлических цепей. М.: Наука, 1985.
2. Новицкий Н.Н., Сеннова Е.В., Сухарев М.Г. и др. Гидравлические цепи. Развитие теории и приложения. Новосибирск: Наука, 2000.
3. Уилсон Р. Введение в теорию графов. М.: Мир, 1977.
4. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1980.
5. Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. М.: Мир, 1990.
6. Ferziger J.H., Peric M. Computational Methods for Fluid Dynamics 3, rev. edition. Springer, 2002.
7. Быстров Ю.А., Исаев С.А., Кудрявцев Н.А., Леонтьев А.И. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб. СПб.: Судостроение, 2005.
8. Fortaggia L., Nobile F., Quarteroni A., Veneziani A. Multiscale modelling of the circulatory system: a preliminary analysis // Computing and Visualization in Science. 1999. V. 2. P. 75–83. DOI: 10.1007/s007910050030.
9. Harvey Ho. et al. A hybrid 1d and 3d approach to hemodynamics modelling for a patient-specific cerebral vasculature and aneurysm // Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2009. Lecture Notes in Computer Science. 2009. V. 5762. P. 323–330.
10. Добросердова Т.К. Численное моделирование кровотока при наличии сосудистых имплантатов или патологий: дис. ... канд. физ.-мат. наук. 2013.
11. Воеводин А.Ф. Никифоровская В.С. Численное моделирование неустановившихся гидротермических процессов в водных объектах // Международная конференция «Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика», посвященная 90-летию со дня рождения академика Н.Н. Яненко, 2011.
12. Twigt D., de Goede E., Zijl F., Chiu A.Y.W. Coupled 1d–3d hydrodynamic modelling, with application to the pearl river delta // Ocean Dynamics. 2009. V. 59. P. 1077–1093. DOI: 10.1007/s10236-009-0229-y.
13. Филимонов С.А., Дектерев А.А., Бойков Д.В. Использование комплексного подхода при исследовании и оптимизации режимов работы систем газоходов // Трубопроводные системы энергетики: Методические и прикладные проблемы моделирования. 2015.
14. Бойков Д.В. Филимонов С.А. Моделирование системы смазки редуктора хода экскаватора // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2010. Т. 3. № 4. С. 454–462.
15. D'Angelo C. Multiscale 1d–3d models for tissue perfusion and applications // 5th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2008). 2008.
16. Филимонов С.А., Дектерев А.А., Бойков Д.В. Численное моделирование кожухотрубчатого теплообменника с помощью гибридного алгоритма // Тепловые процессы в технике. 2014. № 8. С. 86–97.
17. Филимонов С.А., Дектерев А.А., Сентябов А.В., Минаков А.В. Моделирование сопряженного теплообмена в системе микроканалов при помощи гибридного алгоритма // Сиб. журн. индустр. матем. Т. 18. № 3. С. 86–97. 2015. DOI 10.17377/sibjim.2015.18.309.
18. Сторожев Ю.И., Куликов Б.П. Пылегазовые выбросы алюминиевых электролизеров с самообжигающимися анодами: монография. Красноярск: Сиб. фед. ун-т, 2012.
19. Буркат В.С., Друкарев В.А. Сокращение выбросов в атмосферу при производстве алюминия. СПб., 2005.
20. Необъявляющий П.А., Дектерев А.А., Гаврилов А.А., Сторожев Ю.И. Расчетно-экспериментальное исследование горелочного устройства по дожиганию анодного газа // Теплофизика и аэромеханика. 2007. Т. 14. № 1. С. 51–160.
21. Необъявляющий П.А., Дектерев А.А., Литвинцев К.Ю. Исследование сложного теплообмена в многокомпонентных газовых смесях в приложении к устройствам сжигания и транспортировки анодных газов электролизного производства алюминия // XIV Мин-

- ский международный форум по тепломассообмену: тезисы докладов и сообщений. 2012. № 1. С. 214–216.
22. Минаков А.В. Численный алгоритм решения задач гидродинамики с подвижными границами и его тестирование // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2014. Т. 24. № 10. С. 61–72. DOI: 10.7868/S0044466914100111.
  23. Дектерев А.А., Гаврилов А.А., Минаков А.В. Современные возможности Cfd кода sigmaFlow для решения теплофизических задач // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии: сб. статей. 2010. Вып. 2(4). С. 117–122.
  24. Гаврилов А.А., Минаков А.В., Дектерев А.А., Рудяк В.Я. Численный алгоритм для моделирования ламинарных течений в кольцевом канале с эксцентриситетом // Сиб. журн. индустр. матем. 2010. Т. 13. № 4. С. 3–14. DOI: 10.1134/S1990478911040119.
  25. Филимонов С.А., Дектерев А.А., Бойков Д.В. Гибридный подход для решения задач ТПЦ, содержащих пространственные элементы // Трубопроводные системы энергетики: математическое и компьютерное моделирование. С. 46–55. 2014.
  26. Menter F.R. Zonal Two Equation  $k-\omega$  Turbulence Models for Aerodynamic Flows // AIAA Paper. 1993. V. 93-2306. DOI: 10.2514/6.1993-2906.
  27. Цибульский В.В. и др. Методическое пособие по аналитическому контролю выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. СПб., 2012.
  28. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992.
  29. Руководящий документ. Охрана природы. Атмосфера. Требования к точности контроля промышленных выбросов. Методические указания. РД 52.04.59-85.

Статья поступила 12.10.16 г.

Filimonov S.A., Neob'yavlyayushchiy P.A., Mikhienkova E.I. AN APPLICATION OF HYBRID SIMULATION ALGORITHM FOR A RESEARCH OF THE DISPOSAL SYSTEM OF NOXIOUS GASES IN ALUMINIUM PRODUCTION. *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 6(44). pp. 64–79

DOI 10.17223/19988621/44/6

The article deals with the problem of flow-rate balance in the disposal system of noxious gases from an industrial building of aluminum production. This system appears to be a highly branched network about 2 kilometers long, with the baths arranged into several groups of a various number of baths in each. Our team set a problem aimed at evaluating the possibility of the flow balance between the groups so that the each bath could fall within a fixed volume of the removable gas. Normally, the modeling of such problems applies methods of the theory of hydraulic circuits, which requires the system to be a set of nodes and branches. However, the considered system includes a gathering manifold of a complex geometry, which cannot be represented as a set of network elements. Thus, the solving of the problem was carried out using an original 1D/3D hybrid algorithm intended for solving of the multiscale problems of hydrodynamics. A particular feature of this algorithm, based on a SIMPLE procedure, is a common equation for the pressure correction calculated for the entire computational region. The unification of two parts of the problem in the pressure field allows providing a coherence of the solution, a rapid convergence, and a high speed of calculations in comparison with the usual methods of solving such (multiscale) problems, which suppose the separate use of the spatial and network models interrelated with a data exchange on the contact boundary. As a result of the calculation, the hydraulic resistance of the balancing shutter and the total evacuation in a gas purification system for the balanced version have been determined.

Keywords: numerical modeling, CFD, theory of hydraulic circuits, 1D/3D hybrid method, gas purification system.

FILIMONOV Sergey Anatol'evich (TORINS Ltd., Krasnoyarsk, Russian Federation)  
E-mail: bdk@inbox.ru

NEOB"YAVLYAYUSHCHIY Pavel Anatol'evich (TORINS Ltd., Krasnoyarsk, Russian Federation)

E-mail: neopan14@yandex.ru

MIKHENKOVA Evgeniya Igorevna (Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation)

E-mail: mihienkova\_evgeniya@mail.ru

#### REFERENCES

1. Merenkov A.P., Khasilev V.Ya. (1985) *Teoriya gidravlicheskikh tsepey* [The theory of hydraulic circuits]. Moscow: Nauka.
2. Novitskiy N.N., Sennova E.V., Sukharev M.G., et al. (2000) *Gidravlicheskie tsepi. Razvitie teorii i prilozheniya* [Hydraulic circuits. Development of the theory and applications]. Novosibirsk: Nauka.
3. Wilson R.J. (1985) *Introduction to graph theory*. Longman Group Ltd.
4. Patankar S.V. (1984) *Numerical heat transfer and fluid flow*. Washington: Hemisphere.
5. Anderson D.A., Tannehill J.C., Pletcher R.H. (1984) *Computational fluid mechanics and heat transfer*. New York: Hemisphere.
6. Ferziger J.H., Peric M. (2002) *Computational methods for fluid dynamics*. 3 ed. Springer.
7. Bystrov Yu.A., Isaev S.A., Kudryavtsev N.A., Leont'ev A.I. (2005) *Chislennoe modelirovanie vikhrevoi intensivatsii teploobmena v paketakh trub* [Numerical simulation of vortex intensification of the heat exchange in packages of tubes]. St. Petersburg: Sudostroenie.
8. Formaggia L., Nobile F., Quarteroni A., Veneziani A. (1999) Multiscale modelling of the circulatory system: a preliminary analysis. *Computing and Visualization in Science*. 2. pp. 75–83. DOI 10.1007/s007910050030.
9. Ho H. et al. (2009) A hybrid 1D and 3D approach to hemodynamics modelling for a patient-specific cerebral vasculature and aneurysm. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention—MICCAI 2009*. 5762. pp. 323–330.
10. Dobroserdova T.K. (2013) *Chislennoe modelirovanie krovotoka pri nalichii sosudistykh implantatov ili patologiy* [Numerical modeling of the blood flow under presence of vascular implants or pathology]. Candidate's Dissertation in Mathematics and Physics. Moscow.
11. Voevodin A.F., Nikiforovskaya V.S. (2011) *Chislennoe modelirovanie neustanovivshikhsya gidrotermicheskikh protsessov v vodnykh ob'ektakh* [Numerical modeling of unsteady-state hydrothermal processes in water objects]. International Conference "Modern Problems of Applied Mathematics and Mechanics: Theory, Experiment, and Practice" Dedicated to the 90th Anniversary of Academician N.N. Yanenko. Novosibirsk.
12. Twigt D., de Goede E., Zijl F., Chiu A.Y.W. (2009) Coupled 1D–3D hydrodynamic modelling, with application to the Pearl River delta. *Ocean Dynamics*. 59. pp. 1077–1093. DOI 10.1007/s10236-009-0229-y.
13. Filimonov S.A., Dekterev A.A., Boykov D.V. (2015) *Ispol'zovanie kompleksnogo podkhoda pri issledovanii i optimizatsii rezhimov raboty sistem gazokhodov* [Using an integrated approach in the study and optimization of operating modes of flues system]. *Truboprovodnye sistemy energetiki. Metodicheskie i prikladnye problemy modelirovaniya – Pipeline energy systems: Methodological and applied problems of simulation*.
14. Boykov D.V., Filimonov S.A. (2010) *Modelirovanie sistemy smazki reduktora khoda ekskavatora* [Modeling the lubricating system of the reducer of the excavator move]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta: Tekhnika i tekhnologii – Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 3(4). pp. 454–462.
15. D'Angelo C. (2008) Multiscale 1D-3D models for tissue perfusion and applications. *Proc. 5th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2008)*.
16. Filimonov S.A., Dekterev A.A., Boykov D.V. (2014) *Chislennoe modelirovanie kozhukhotrubchatogo teploobmennika s pomoshch'yu gibridnogo algoritma* [Numerical

- simulation of shell-and-tube heat exchanger using a hybrid algorithm]. *Teplovye protsessy v tekhnike – Thermal processes in engineering*. 8. pp. 86–97.
17. Filimonov S.A., Dekterev A.A., Sentyabov A.V., Minakov A.V. (2015) Modelirovanie sopryazhennogo teploobmena v sisteme mikrokanalov pri pomoshchi gibridnogo algoritma [Modeling of conjugate heat transfer in a system of microchannels using a hybrid algorithm]. *Sibirskiy zhurnal industrial'noy matematiki – Siberian journal of industrial mathematics*. 18(3). pp. 86–97. DOI 10.17377/sibjim.2015.18.309.
  18. Storozhev Yu.I. Kulikov, B.P. (2012) *Pylegazovye vybrosy alyuminievykh elektrolizerov s samoobzhigayushchimisya anodami* [Dust and gas emissions of aluminum electrolyzers with self-baking anodes]. Krasnoyarsk: SFU.
  19. Burkat V.S. Drukarev V.A. (2005) *Sokrashchenie vybrosov v atmosferu pri proizvodstve alyuminiya* [Reducing emissions to the atmosphere during aluminium production]. St. Petersburg.
  20. Neob'yavlyayushchiy P.A., Dekterev A.A., Gavrilov A.A., Storozhev Yu.I. (2007) Raschetno-eksperimental'noe issledovanie gorelochnogo ustroystva po dozhiganiyu anodnogo gaza [Numerical and experimental investigation of burner device for anode gas reburning]. *Teplofizika i aeromekhanika – Thermophysics and Aeromechanics*. 14(1). pp. 51–160.
  21. Neob'yavlyayushchiy P.A., Dekterev A.A., Litvintsev K. Yu. (2012) Issledovanie slozhnogo teploobmena v mnogokomponentnykh gazovykh smesyakh v prilozhenii k ustroystvam szhiganiya i transportirovki anodnykh gazov elektroliznogo proizvodstva alyuminiya [The study of a complex heat transfer in multicomponent gas mixtures in application to the devices of burning and transportation of anode gases of electrolysis aluminum production]. *Tezisy dokladov i soobshcheniy. XIV Minskiy mezhdunarodnyy forum po teplomassoobmenu – The theses of reports and messages. XIV Minsk international forum on heat and mass transfer*. 1. pp. 214–216.
  22. Minakov A.V. (2014) Chislennyy algoritm resheniya zadach gidrodinamiki s podvizhnymi granitsami i ego testirovanie [Numerical algorithm for moving-boundary fluid dynamics problems and its testing]. *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki – Computational mathematics and mathematical physics*. 24(10). pp. 1618–1629. DOI 10.7868/S0044466914100111.
  23. Dekterev A.A., Gavrilov A.A., Minakov A.V. (2010) Sovremennyye vozmozhnosti Cfd koda sigmaFlow dlya resheniya teplofizicheskikh zadach [Up-to-date features of the CFD code SigmaFlow for solving the thermal physical problems]. *Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezul'taty, tekhnologii. Sbornik statey*. 4(2). pp. 117–122.
  24. Gavrilov A.A., Minakov A.V., Dekterev A.A., Rudyak V.Ya. (2011) A numerical algorithm for modeling laminar flows in an annular channel with eccentricity. *Journal of Applied and Industrial Mathematics*. 5 (4). pp. 559–568. DOI 10.1134/S1990478911040119.
  25. Filimonov S.A., Dekterev A.A., Boykov D.V. (2014) Gibridnyy podhod dlya resheniya zadach TGTS, soderzhashchikh prostranstvennyye elementy [A hybrid approach for solving problems of THC containing spatial elements]. *Truboprovodnyye sistemy energetiki: matematicheskoe i kompyuternoe modelirovanie – Pipeline system energy: mathematical and computer modeling*. pp. 46–55.
  26. Menter F.R. (1993) Zonal two equation  $k-\omega$  turbulence models for aerodynamic flows. *AIAA Paper*. 93-2306. DOI 10.2514/6.1993-2906.
  27. Tsubulskiy V.V. et al. (2002) *Metodicheskoe posobie po analiticheskomu kontrolyu vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosferu* [Textbook for analytical control of contaminating emissions into the atmosphere]. St. Petersburg.
  28. Idel'chik I.E. (1992) *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* [Handbook of hydraulic resistance]. Moscow: Mashinostroenie.
  29. Rukovodyashchiy dokument. Okhrana prirody. Atmosfera. Trebovaniya k tochnosti kontrolya promyshlennykh vybrosov. Metodicheskie ukazaniya [Guidance document. Protection of the nature. Atmosphere. Accuracy requirements for monitoring of industrial emissions. HOWTO]. RD 52.04.59-85.