УДК 621.45:034.3

ОПТИМИЗАЦИОННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА

© 2026 С. Г. Черный[1a], Д. Тарраф[2b]

[1] *Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 1, Россия 630090, Новосибирск,*
[2] *Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова, 2, Россия 630090, Новосибирск*

E-mails: [a]sgcherny2023@yandex.ru, [b]daniel.tarraf.93@gmail.com

Поступила в редакцию 12.09.2025 г.; после доработки 26.12.2025 г.; принята к публикации 13.05.2026 г.

Поставлены и решены многокритериальные оптимизационные задачи моделирования процесса распыла и испарения жидкого углеводородного сырья в реакторе печного производства технического углерода. Их решения дают регламент работы реактора, при котором достигаются наибольшие дисперсность и структурность технического углерода при минимальном его загрязнении коксом и в то же время при достаточно высоком выходе продукта. Целевые функции определяются по численному решению прямой задачи распыла и испарения сырья, сформулированной на основе трёхмерной модели Эйлера (Eulerian), принадлежащей эйлерово-эйлерову подходу к описанию многофазных течений в ПК ANSYS. В построенных таким образом целевых функциях учтена теоретическая и эмпирическая информация о влиянии параметров углеводородов в реакционной зоне на дисперсность и структурность технического углерода. В частности, учтена простейшая взаимосвязь — чем выше концентрация углеводородов в реакционной зоне, тем выше структурность технического углерода. В качестве целевой функций может быть взят коагуляционный параметр структурообразования ψ, учитывающий концентрацию, средний диаметр и средний заряд частиц технического углерода перед коагуляцией. С увеличением ψ показатель структурности частиц технического углерода возрастает. В качестве целевой функции планируется рассмотреть среднее отклонение размеров капель. На концентрацию и средний диаметр частиц перед коагуляцией, кроме температуры процесса и начальной концентрации углеводородного сырья в реакторе, оказывает влияние изменение числа ароматических колец в средней молекуле сырья. Рост колец приводит к возрастанию структурности технического углерода. В построенные в работе целевые функции также заложены механизмы достижения заданной степени мелкости распыла сырья, равномерности распределения капель, обеспечения полного испарения сырья, исключения контакта неиспарившегося сырья с футеровкой реактора (со стенкой), так как такой контакт приводит к образованию кокса. Для достижения экстремумов перечисленных функционалов варьируются скорость и температура газа-теплоносителя на входе в реактор, скорость и температура закачиваемого сырья. Оптимизационная задача решается с помощью генетического метода. Представлены результаты проведённых численных экспериментов.

Ключевые слова: технический углерод, обратная задача процесса распыла и испарения сырья в реакторе пиролизного производства технического углерода.

DOI: 10.33048/SIBJIM.2026.29.309

ВВЕДЕНИЕ

Печной процесс производства технического углерода представляет собой пиролиз углеводородного сырья в потоке газа-теплоносителя — смеси продуктов сгорания природного газа с температурой до 1900°C, имеющей состав: N_2 (73%), H_2 (15%), CO_2 (O.7%) и O_2 (5%). Впрыс-

киваемое сырье, смешиваясь с газом-теплоносителем, дробится на капли, которые затем испаряются [3]. Важно, чтобы капли сырья полностью испарились до начала пиролиза, поскольку технический углерод образуется при разложении углеводородов в газообразном состоянии. При разложение жидких капель сырья при высоких температурах образуются частицы кокса, загрязняющие продукт.

На рис. 1 представлена область в окрестности места впрыска сырья в реактор.

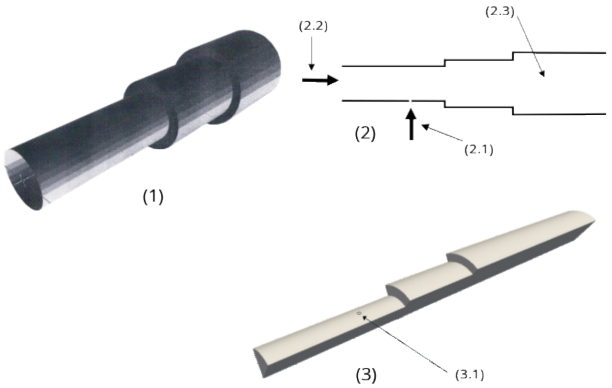


Рис. 1. Расчетная область и ее сегментация:
1 — изометрия реального реактора; 2 — схема работы реактора;
2.1 — сырье, подаваемое в реактор через 6 форсунок; 2.2 — газ-теплоноситель;
2.3 — реакционная зона; 3 — расчетная область (циклическое приближение); 3.1 — форсунка

Сырьё вводится шестью форсунками, равномерно распределёнными в окружном направлении сечения, перпендикулярного оси реактора. От степени распыла сырья форсунками и равномерности распределения капель в потоке газа-теплоносителя зависит структурность технического углерода, а также вероятность образования грита [4]. Входные параметры процесса производства технического углерода, в том числе — форма реактора, должны быть такими, при которых исключался бы контакт неиспарившегося сырья с футеровкой реактора (со стенкой). Также должны контролироваться мелкость распыла сырья, равномерность распределения капель в потоке газа-теплоносителя, при которых происходит полное его испарение до начала пиролиза и формируется оптимальная структурность технического углерода.

В настоящей работе на основе методов математического моделирования предлагается аппарат оптимизационного проектирования технологии всего процесса производства технического углерода. Решения многокритериальных оптимизационных задач моделирования процесса распыла и испарения жидкого углеводородного сырья в реакторе дают регламент работы реактора, при котором достигаются наибольшие дисперсность и структурность технического углерода при минимальном его загрязнении коксом и в то же время при достаточно высоком выходе продукта. Целевые функции определяются по численному решению прямой задачи распыла и испарения сырья. В них учитывается имеющаяся теоретическая и эмпирическая информация о влиянии параметров углеводородов в реакционной зоне на дисперсность и структурность технического углерода. Экстремумы целевых функций отыскиваются на множествах допустимых скоростей и температур закачиваемого газа-теплоносителя, а также на множестве скоростей и температур подаваемого сырья. Оптимизационная задача решается с помощью генетического метода [2]. Результаты проведённых численных экспериментов представлены в данной работе.

1. ОПИСАНИЕ ЗАДАЧИ

Объектом исследования является проточная часть реактора, составленная из трёх цилиндрических каналов с увеличивающимися диаметрами по направлению потока газа-теплоносителя, изометрическая проекция которого изображена в верхнем левом углу рис. 1. В правом верхнем углу рис. 1 представлена схема работы реактора, на которой указаны входное сечение подачи в реактор газа-теплоносителя и форсунки, через которые закачивается жидкое углеводородное сырьё. В правом нижнем углу рис. 1 изображён расчётный сегмент области реактора, переход на который допустим в силу цикличности течения в реакторе Исходные данные прямой задачи моделирования процесса распыла и испарения сырья в газе-теплоносителе приведены ниже.

— Шесть форсунок (равномерно расположены по окружности в одном сечении).

— Расход сырья на одну сырьевую форсунку $0.6\,м^3/ч$; скорость $27\,м/с$. На шесть сырьевых форсунок суммарный расход $3.6\,м^3/ч$.

— Кинематическая вязкость сырья $24.1\,мм^2/с$, при температуре $30°C$ и давлении $0{,}8\,МПа$.

— Плотность сырья $1050\,кг/м^3$, при температуре $20°C$.

— Плотность газа-теплоносителя $165\,кг/м^3$, при температуре $1860°C$ и давлении $0{,}03\,МПа$.

— Расход газа теплоносителя $93697\,м^3/ч$; скорость $422\,м/с$.

— Кинематическая вязкость газа-теплоносителя $419 \times 10^{-6}\,м^2/с$.

Предметом исследования являются газодинамические свойства процесса распыла и испарения сырья в газе-теплоносителе. Требуется определить дисперсный состав распыляемого сырья и степень его испарения.

2. ПРЯМАЯ И ОБРАТНАЯ ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЕЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА

Определим понятия «прямая» и «обратная» задачи моделирования процесса производства технического углерода в реакторе. Прямая задача численного моделирования распыла и испарения жидкого углеводорода (ЖУ) может быть представлена схематично

$$\mathbf{V} = f(\mathbf{X}), \tag{1}$$

где $\mathbf{X} = (x_1, \ldots, x_N)$ — входные параметры модели. $\mathbf{X}$ включает параметры, подверженные вариациям при решении обратной задачи, обозначим их как $\mathbf{Y} = (y_1, \ldots, y_s) \subset \mathbf{X}$. $\mathbf{V} = (V_1, \ldots, V_M)$ — выходные параметры модели. По ним определяются характеристики распыла и испарения ЖУ, которые требуется достигнуть. Обозначим их зависимость от выходных параметров через вектор $\mathbf{Z} = \mathbf{Z}(\mathbf{V}) = (Z_1, \ldots, Z_L)$.

Пусть Z^* — требуемые характеристики процесса распыла и испарения ЖУ. Тогда их получение обеспечат выходные параметры $\mathbf{V}^* = \mathbf{Z}^{-1}(\mathbf{Z}^*)$ и, следовательно, для их нахождения необходимо решить обратную задачу моделирования процесса распыла и испарения ЖУ

$$\mathbf{X}^* = f^{-1}(\mathbf{V}^*) = f^{-1}(\mathbf{Z}^{-1}(\mathbf{Z}^*)), \tag{2}$$

и извлечь $\mathbf{Y}^*$ из $\mathbf{X}^*$. Непосредственное решение уравнения (2) называется прямым методом решения обратной задачи. Решение оптимизационной задачи

$$\min_{\mathbf{Y}} F_1, \ \ldots, \ \min_{\mathbf{Y}} F_L \tag{3}$$

где

$$\mathbf{F} = \mathbf{Z}^* - \mathbf{Z}(f(\mathbf{X})) = (F_1, \ldots, F_L),$$

называется оптимизационным или итерационным методом решения обратной задачи. В работе обратная задача (2) моделирования процесса решается оптимизационным методом (3). Предварительно проводился анализ чувствительности решения прямой задачи (1) к её входным

параметрам. В результате проведённого анализа чувствительности определялись параметры $\mathbf{Y} = (y_1, \ldots, y_s) \subset \mathbf{X}$ из вектора входных параметров модели $\mathbf{X} = (x_1, \ldots, x_N)$, варьируемые в (3).

2.1. Математическая модель прямой задачи процесса печного производства технического углерода

Распыл и испарение ЖУ в потоке ГТ описывается эйлеровой моделью (Eulerian), принадлежащей эйлерово-эйлерову подходу к описанию многофазных течений в ПК ANSYS Fluent [1]. Задача решается в двухфазном приближении. Несущая фаза — ГТ и продукты испарения ЖУ (ПИЖ), дисперсная — ЖУ и его капли, образующиеся в результате распада струи ЖУ. Далее коротко перечисляются основные группы уравнений модели.

2.1.1. Уравнения движения.

Уравнение неразрывности несущей фазы:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_c \rho_c) + \nabla \cdot (\alpha_c \rho_c \mathbf{u}_c) = \dot{m}_{lc} - \dot{m}_{cl},$$

здесь α_c — объёмная доля несущей фазы, $\mathbf{u}_c$ — скорость несущей фазы, ρ_c — плотность несущей фазы, $\dot{m}_{lc}$ — массоперенос из жидкой фазы в несущую фазу, $\dot{m}_{cl}$ — массоперенос из несущей фазы в жидкую фазу. Объёмная доля жидкой фазы α_c рассчитывается по формуле $\alpha_l = 1 - \alpha_c$.

Уравнения сохранения импульса жидкой и несущей фаз:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_c \rho_c \mathbf{u}_c) + \nabla \cdot (\alpha_c \rho_c \mathbf{u}_c \mathbf{u}_c) = -\alpha_c \nabla p + \nabla \cdot (\alpha_c \hat{\tau}_{\text{eff},c}) + \alpha_c \rho_c \mathbf{g} + K(\mathbf{u}_c - \mathbf{u}_l) + \dot{m}_{lc}\mathbf{u}_{lc} - \dot{m}_{cl}\mathbf{u}_{cl}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l \rho_l \mathbf{u}_l) + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \mathbf{u}_l \mathbf{u}_l) = -\alpha_l \nabla p + \nabla \cdot (\alpha_l \hat{\tau}_{\text{eff},l}) + \alpha_l \rho_l \mathbf{g} + K(\mathbf{u}_l - \mathbf{u}_c) + \dot{m}_{cl}\mathbf{u}_{cl} - \dot{m}_{lc}\mathbf{u}_{lc}, \quad (5)$$

здесь p — давление, одинаково для обеих фаз, $\mathbf{g}$ — сила тяжести, K — коэффициент межфазного обмена импульсом, $\hat{\tau}_{\text{eff},c}$ — эффективный тензор напряжений несущей фазы, $\hat{\tau}_{\text{eff},l}$ — эффективный тензор напряжений жидкой фазы, ρ_l — плотность жидкости, $\mathbf{u}_l$ — скорость жидкости, $\mathbf{u}_{lc}$ и $\mathbf{u}_{cl}$ — межфазные скорости, определяются следующим образом: Если $\dot{m}_{lc} > 0$ (т. е. происходит массоперенос из жидкой фазы в несущую фазу), то $\mathbf{u}_{lc} = \mathbf{u}_l$. И если $\dot{m}_{lc} < 0$ (т. е. массоперенос происходит из несущей фазы в жидкую фазу), то $\mathbf{u}_{lc} = \mathbf{u}_c$. Аналогично, если $\dot{m}_{cl} > 0$ то $\mathbf{u}_{cl} = \mathbf{u}_c$; и если $\dot{m}_{cl} < 0$ то $\mathbf{u}_{cl} = \mathbf{u}_l$. Эффективные тензоры напряжений $\hat{\tau}_{\text{eff},c}$, $\hat{\tau}_{\text{eff},l}$ определяются следующим образом:

$$\hat{\tau}_{\text{eff},c} = \mu_{\text{eff},c}\big(\nabla \mathbf{u}_c + \nabla \mathbf{u}_c^T\big) + \frac{2}{3}(\rho_c k - \mu_{\text{eff},c} \nabla \cdot \mathbf{u}_c)\hat{I},$$

$$\hat{\tau}_{\text{eff},l} = \mu_{\text{eff},l}\big(\nabla \mathbf{u}_l + \nabla \mathbf{u}_l^T\big) + \frac{2}{3}(\rho_l k - \mu_{\text{eff},l} \nabla \cdot \mathbf{u}_l)\hat{I},$$

$$\mu_{\text{eff},c} = \mu_t + \mu_c, \quad \mu_{\text{eff},l} = \mu_t + \mu_l,$$

где μ_t — турбулентная вязкость, μ_c — вязкость несущей фазы, μ_l — вязкость жидкой фазы, k — кинетическая турбулентная энергия.

Уравнения сохранения энергии жидкой и несущей фаз:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_c \rho_c h_c) + \nabla \cdot (\alpha_c \rho_c \mathbf{u}_c) = \alpha_c \frac{\partial p}{\partial t} + (\alpha_c \hat{\tau}_{\text{eff},c}) \nabla \mathbf{u}_c - \nabla \cdot (\alpha_c \kappa_{\text{eff},c} \nabla T_c) + Q_{lc} + \dot{m}_{lc} h_{lc} + \dot{m}_{cl} h_{cl}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l\rho_l h_l) + \nabla\cdot(\alpha_l\rho_l\mathbf{u}_l) = \alpha_l\frac{\partial p}{\partial t} + (\alpha_l\hat{\tau}_{\text{eff},l})\nabla\mathbf{u}_l - \nabla\cdot(\alpha_l\kappa_{\text{eff},l}\nabla T_l) + Q_{cl} + \dot{m}_{cl}h_{cl} + \dot{m}_{cl}h_{lc}. \quad (7)$$

Здесь h_c — явная энтальпия несущей фазы, $\kappa_{\text{eff},c}$ — эффективная теплопроводность несущей фазы, T_c — температура несущей фазы, h_l — явная энтальпия дисперсной фазы, $\kappa_{\text{eff},l}$ — эффективная теплопроводность дисперсной фазы, T_l — температура дисперсной фазы, $Q_{lc} = Q_{cl}$ — теплообмен между фазами, h_cl и h_lc межфазная энтальпия. Величины h_cl, h_lc, $\kappa_{\text{eff},c}$, $\kappa_{\text{eff},l}$ определяются следующим образом:

$$h_c = c_{p,c}(T_c - T_{\text{ref}}), \quad h_l = c_{p,l}(T_l - T_{\text{ref}}),$$
$$\kappa_{\text{eff},c} = \kappa_c + \frac{c_{p,c}\mu_t}{\text{Pr}_t}, \quad \kappa_{\text{eff},l} = \kappa_l + \frac{c_{p,l}\mu_t}{\text{Pr}_t}.$$

Здесь κ_c,κ_l — теплопроводность несущей и жидкой фаз, T_{ref} — эталонная температура, $c_{p,c}$, $c_{p,l}$ — теплоёмкости несущей и жидкой фаз, Pr_t — турбулентное число Прандтля.

2.1.2. Уравнение переноса массовой доли ПИЖ.

Уравнение переноса массовой доли ПИЖ имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_c\rho_c Y_v) + \nabla\cdot(\alpha_c\rho_c\mathbf{u}_c Y_v) = -\nabla\cdot(\alpha_c\mathbf{J}_v) + \dot{m}_{lc} - \dot{m}_{cl},$$

здесь Y_v — массовая доля ПИЖ, $\mathbf{J}_v$ — диффузионный поток ПИЖ:

$$\mathbf{J}_v = -\left(\rho_c D_{v,c} + \frac{\mu_t}{\text{Sc}_t}\right)\nabla Y_v,$$

где D_{vmc} — коэффициент массовой диффузии ПИЖ, Sc_t — турбулентное число Шмидта, μ_t — турбулентная вязкость.

Все физические свойства несущей фазы ϕ_c (плотность, вязкость, теплоёмкость и т.д.) рассчитываются на основе соответствующих свойств ГТ ϕ_g и ПИЖ ϕ_v следующим образом:

$$\phi_c = Y_v\phi_v + (1 - Y_v)\phi_g.$$

2.1.3. Замыкание системы.

Коэффициент межфазного обмена импульсом. В уравнения (4) и (5) входит коэффициент межфазного обмена импульсом:

$$K = \frac{\rho_l f}{6\tau_l}d_l A,$$

здесь A — межфазная поверхность, d_l — диаметр капель жидкой фазы, f — функция сопротивления, τ_l — время релаксации частиц, которое определяется следующим образом:

$$\tau_l = \frac{\rho_l d_l^2}{18\mu_c}.$$

Функция сопротивления f определяется из формул Шиллера и Науманна [5]:

$$f = \frac{C_D\text{Re}}{24},$$

где

$$C_D = \begin{cases} 24(1 + 0.15\text{Re}^{0.687})/\text{Re}, & \text{Re} \leqslant 1000, \\ 0.44, & \text{Re} > 1000, \end{cases}$$

Re — относительное число Рейнольдса: $\text{Re} = \dfrac{\rho u_c - u_l d_l}{\mu_c}$.

Межфазная поверхность A определяется следующим образом: $A = 6/d_l$.

Коэффициента теплообмена. В уравнениях (6) и (7) коэффициент теплообмена определяется следующим образом:

$$Q_{lc} = \frac{\kappa_c \mathrm{Nu}_l}{d_l} A(T_l - T_c).$$

Здесь κ_c — теплопроводность несущей фазы, Nu_l — число Нуссельта жидкой фазы, моделируется с помощью модели Ранца — Маршалла [6, 7]

$$\mathrm{Nu}_l = 2 + 0.6\,\mathrm{Re}^{0.5}\,\mathrm{Pr}^{1/3},$$

где Pr — число Прандтля несущей фазы, определяется следующим образом: $\mathrm{Pr} = \dfrac{c_{p,c}\mu_c}{\kappa_c}$, где $c_{p,c}$ — удельная теплоёмкость несущей фазы.

Массоперенос. В ANSYS Fluent имеется несколько способов моделирования процесса испарения. Наиболее распространённой и простой является модель испарения Ли [8]. Одним из требований этой модели является задание параметров временной релаксации. Эти параметры находятся по экспериментальным данным. В другой модели испарения массоперенос происходит через границу раздела фаз с объёмной скоростью, зависящей от градиента массовой концентрации переносимых частиц в фазах,

$$\dot{m}_{lc} = k_{lv} A(K^{\rho}_{vl}\rho_l - \rho_v)$$

Здесь k_{lv} — объёмный коэффициент массопереноса, K^{ρ}_{vl} — равновесное соотношение. Параметры k_{lv} и K^{ρ}_{vl} рассчитываются по закону двух сопротивлений, впервые предложенному Whitman [9],

$$\frac{1}{k_{lv}} = \frac{1}{k_v} + \frac{K^{\rho}_{vl}}{k_l}.$$

Здесь, k_l — коэффициент массообмена жидкости, k_v — коэффициент массоотдачи ПИЖ. Равновесное соотношение K^{ρ}_{vl} определяется по формуле Рауля:

$$K^{\rho}_{vl} = \frac{p}{P^{v}_{\mathrm{sat}}}, \tag{8}$$

где P^{v}_{sat} — давление насыщения продуктов испарения жидкости. Его зависимость от температуры дисперсной фазы ($P^{v}_{\mathrm{sat}} = P^{v}_{\mathrm{sat}}(T_l)$) является характеристикой жидкости и обуславливает степень её испарения.

2.2. Метод решения прямой задачи процесса печного производства технического углерода

Для решения представленных в разд. 2.1 уравнений эйлеровой модели (Eulerian) из эйлерово-эйлерова подхода к описанию многофазных течений используется численный метод конечных объёмов. Первым шагом этого метода является дискретизация, в ходе которой область реактора разделяется на расчётные ячейки. Для каждой ячейки, уравнения сохранения для решаемых функции $\phi_c = (\alpha_c, \mathbf{u}_c, h_c)$ и $\phi_l = (\mathbf{u}_l, h_l)$ могут быть представлены в виде

$$\frac{\partial}{\partial t}\int\limits_V \rho_c\phi_c dV + \oint\limits_A \rho_c\phi_c\mathbf{u}_c\hat{\mathbf{n}}_A\,dA = \oint\limits_A \Gamma_{\phi_c}\nabla\Phi_c\,dA + \int\limits_V S_{\phi_c}\,dV,$$
$$\frac{\partial}{\partial t}\int\limits_V \rho_l\phi_l\,dV + \oint\limits_A \rho_l\phi_l\mathbf{u}_l\hat{\mathbf{n}}_A\,dA = \oint\limits_A \Gamma_{\phi_l}\nabla\Phi_l dA + \int\limits_V S_{\phi_l}\,dV,$$

где V — объём ячейки, A — поверхности ячейки. Эти уравнения, поскольку каждая ячейка представляет собой многогранник, могут быть записаны следующим образом:

$$\frac{\partial \rho_c \phi_c}{\partial t} V + \sum_f \rho_{c,f} \phi_c \mathbf{u}_{c,f} A_f = \sum_f \Gamma_{\phi_c} \nabla \Phi_{c,f} A_f + S_{\phi_c} V,$$
$$\frac{\partial \rho_l \phi_l}{\partial t} V + \sum_f \rho_{l,f} \phi_l \mathbf{u}_{l,f} A_f = \sum_f \Gamma_{\phi_l} \nabla \Phi_{l,f} A_f + S_{\phi_l} V.$$

Здесь величины $\rho_c, \phi_c, \Gamma_{\phi_c}, S_{\phi_c}, \rho_l, \phi_l, \Gamma_{\phi_l}, S_{\phi_l}$ являются значениями в центрах ячеек, а $\rho_{c,f}, \mathbf{u}_{c,f}, \phi_{c,f}, \rho_{l,f}, \mathbf{u}_{l,f}, \phi_{l,f}$ — в центре грани ячейки, A_f — площадь поверхности расчётной ячейки f.

Далее проводится дискретизация уравнений по пространственным переменным. При этом противопоточная аппроксимация второго порядка используется для момента $\phi_f = \phi + \nabla\phi \cdot \mathbf{r}$. Здесь ϕ и $\nabla\phi$ — значение в центре ячейки и его градиент в ячейке выше по потоку, $\mathbf{r}$ — вектор, направленный от центра ячейки к центру грани. Центрально-разностная аппроксимация второго порядка используется для давления и энтальпии

$$\phi_f = \frac{1}{2}(\phi_0 + \phi_1) + \frac{1}{2}(\nabla\phi_0 \mathbf{r}_1 + \nabla\phi_1 . \mathbf{r}_2),$$

где индексы 0 и 1 относятся к соседним ячейкам, которые разделяет грань f. Аппроксимация градиента функции осуществляется методом наименьших квадратов, реализованным на неструктурированных сетках на плоскости с «плохой» геометрией ячеек

$$\nabla\phi = (\mathbf{d}^T \mathbf{d})^{-1} \mathbf{d}^T (\phi_N - \phi),$$

где $\mathbf{d}$ — расстояния между центром ячейки и центрами её соседей; $(\phi_N - \phi)$ — разность значений ϕ в центре ячейки и в центрах её соседей. Ошибка метода зависит от геометрии ячеек. Весовые коэффициенты в методе наименьших квадратов подобраны таким образом, что аппроксимация градиента функции значительно улучшена.

Полученная в результате дискретизации дифференциальных уравнений система линейных алгебраических уравнений с неизвестной функцией $\phi = (\alpha_c, \mathbf{u}_c, h_c, \mathbf{u}_l, h_l)$ представляется в виде $A\phi = B$ и решается связанным методом. В связанном методе уравнения моментов и уравнение для давления, выведенное из уравнения неразрывности, решаются одновременно. Связанная схема обеспечивает надёжную и эффективную реализацию одной фазы для стационарных потоков с производительностью, превосходящей производительность схем сегрегированного решения. Связанный алгоритм на основе давления является альтернативным сегрегированному алгоритму на основе плотности и давления с помощью связи давления и скорости типа SIMPLE. Для переходных течений применение связанного алгоритма необходимо, когда качество сетки плохое или если используются большие временные шаги.

2.3. Обоснование достоверности решения прямой задачи

Для подтверждения адекватности предложенной численной модели процесса распыла и испарения сырья в реакторе печного производства технического углерода решены с использованием созданного для её реализации кода теоретически или экспериментально изученные в имеющихся литературных источниках тестовые задачи.

2.3.1. Распыл воды в потоке воздуха. В [10] нами численно решена задача о распыле воды в потоке воздуха в канале прямоугольного сечения, показанном на рис. 2.

В [11] задача исследована также численно с использованием VOF подхода в программном комплексе ANSYS Fluent, а в [12] — экспериментально. Поток воздуха со скоростью 120,4 м/с

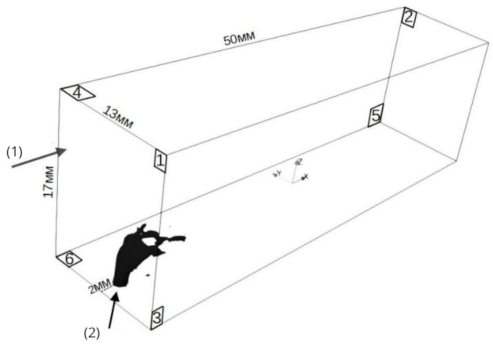


Рис. 2. Распыление воды в прямоугольном канале:
1 — участок, через который воздух входит в канал; 3, 4, 5, 6 — твёрдые стенки канала;
2 — участок, через который воздух выходит из канала;
(1) — воздух; (2) — вода

подаётся во входное сечение (1) прямоугольного канала с боковыми твёрдыми стенками (3), (4), (5) и (6), а выходит из канала через сечение (2). Вода со скоростью 10,83 м/с закачивается в канал через отверстие в стенке (6) перпендикулярно потоку воздуха. На рис. 3 показаны центральные линии струй дисперсной фазы, полученные в [10] численно по эйлеровой модели для трёх различных значений её параметра — характерного размера частиц дисперсной фазы d: 10^{-5} м — сплошная красная линия, 3×10^{-4} м — пунктирная зелёная линия, 10^{-4} м — сплошная синяя линия. Пунктирной чёрной линией обозначены данные из [11], а сплошной чёрной линией данные из [12].

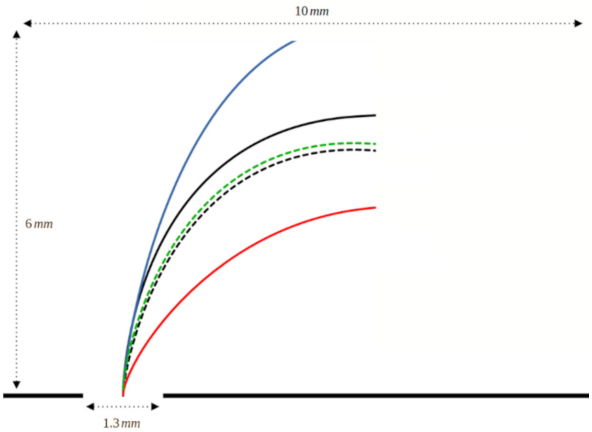


Рис. 3. Сравнение осевых линий струи.
Эксперимент [12] — сплошная чёрная линия; VOF [11] — штриховая чёрная линия;
Эйлеров подход [10]: $d = 10^{-4}$ — сплошная синяя линия;
$d = 3 \times 10^{-4}$ — штриховая зелёная линия; $d = 10^{-5}$ — сплошная красная линия

2.3.2. Распыл керосина в камере сгорания газовых турбин. В [10] решена ещё одна задач, экспериментально исследованная в [13]. В плоский канал, через который прокачивается со скоростью 120 м/с воздух, распыляется керосин (см. рис. 4).

На рис. 5 представлено распределение объёмной доли керосина, взятое из решения задачи с использованием построенного кода. С помощью созданного в [10] метода интерпретации распределения объёмной доли жидкости в терминах её капель распыл керосина был представлен в виде распределения множества капель различных размеров.

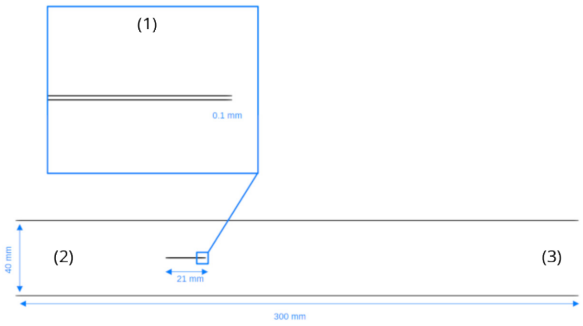


Рис. 4. Распыление керосина в поток воздуха в плоском канале:
1 — сопло керосина; 2 — вход воздуха; 3 — выход смеси

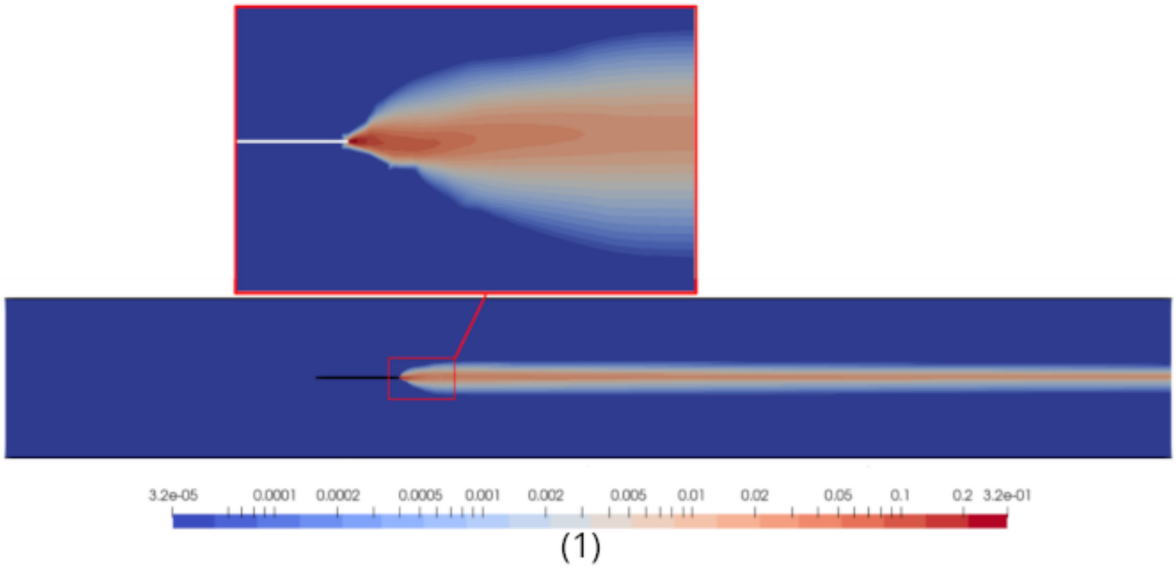


Рис. 5. Распределение объёмной доли керосина:
1 — объёмная доля керосина (логарифмическая шкала)

По распределению капель посчитана скорость испарения керосина V_{evap}/V_0. Здесь в числителе разность объёмных потоков капель керосина в сечении x_0, в котором керосин подаётся в поток воздуха, и контрольных сечениях $x_1 = 30$ мм, $x_2 = 60$ мм, $x_3 = 100$ мм, and $x_4 = 150$ мм, расположенных вниз по потоку от x_0. В знаменателе — поток в x_0. Также вычислены средние диаметры Заутера SMD в четырёх поперечных полосах канала, имеющих ширину 10мм, а их центры находятся в точках $x_1 = 30$ мм, $x_2 = 60$ мм, $x_3 = 100$ мм, and $x_4 = 150$ мм. Сравнения скорости испарения V_{evap}/V_0 и среднего диаметра Заутера SMD капель керосина, полученных численно и экспериментально в [13], приведены на рис. 6.

2.3.3. Влияние концентрации капель на степень испарения . В [14] проводится эксперимент, в котором смесь капель воды и воздуха подаётся в цилиндр, наполненный воздухом. Температура воздуха в цилиндре больше температуры закачиваемой в него смеси. Капли испаряются и по достижению конца цилиндра средний диаметр долетевших капель оказывается меньше среднего диаметра капель на входе в цилиндр. Влияние среднего диаметра капель воды на входе в цилиндр на степень их испарения устанавливается в [14]. В [15] разработанный авторами настоящей работы код применён для численного анализа влияния концентрации капель на входе в цилиндр на степень испарения. Во входном сечении цилиндра отношение объёма воды во всех каплях к объёму воздуха в распыляемой смеси взято $\gamma_{\text{in}} = 10^{-3}$, скорость

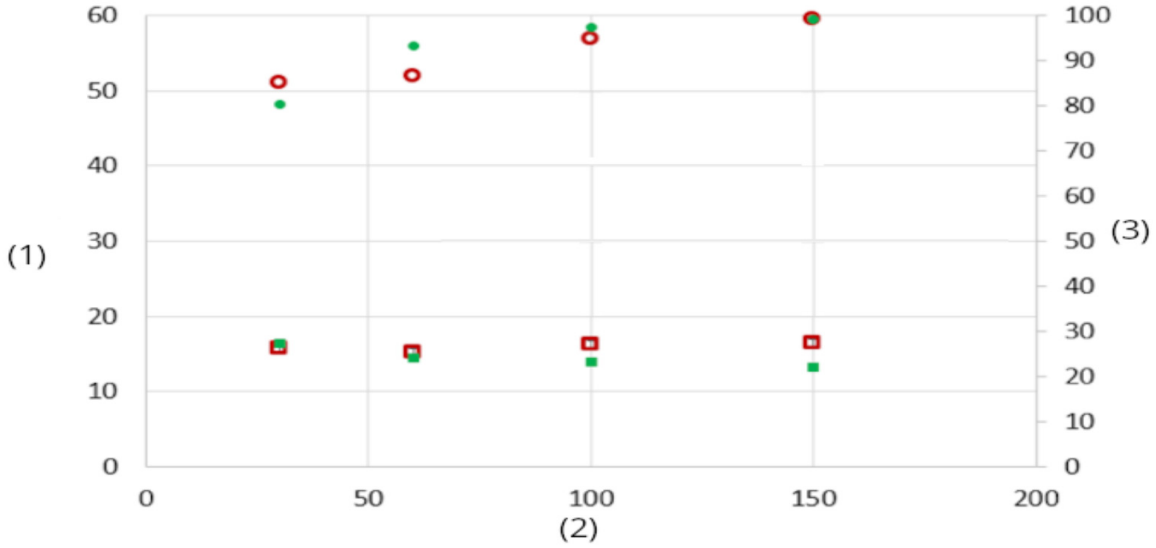


Рис. 6. Сравнение скорости испарения капель керосина V_{evap}/V_0 (кружки) и среднего диаметра Заутера (квадраты); экспериментальные значения — красный цвет, расчётные значения — зелёный цвет; (1) — SMD (μм); (2) — x (мм); (3) – V_{evap}/V_0

капель воды задана равной $\mathbf{u}_d = 3$ м/с, а скорость воздуха $\mathbf{u}_a = 1.5$ м/с. Средний размер капель поддерживается во входном сечении постоянным, равным R_d. Температура смеси $T = 300$ K, температура воздуха в цилиндре $T = 1070$ K. В [14] степень испарения ΔR рассчитывается по R_d и размеру капель в выходном сечении цилиндра R_d^* по формуле $\Delta R = (R_d - R_d^*)/R_d \cdot 100\%$. В [15] степень испарения определяется по формуле $\Delta F = \dfrac{F_{\text{in}} - F_{\text{out}}}{F_{\text{in}}} \cdot 100\,\%$, где F_{in} — массовый расход воды во входном сечении цилиндра, F_{out} — массовый расход воды в выходном сечении цилиндра. В расчёте размер капель жидкой фазы во входном сечении d_l.

Степени испарения ΔF рассчитывались для пяти значений d_l (0.07 мм, 0.1 мм, 0.145 мм, 0.19 мм и 0.245 мм). На рис. 7 зависимость $(d_l, \Delta F)$ показана синими линиями и прямоугольниками, соответствующими заданным значениям d_l. Зависимость $(R_d, \Delta R)$ показана чёрным цветом.

2.4. Методы решения обратных задач

Методы решения обратных задач подразделяются на две группы: прямые методы решения обратных задач и итерационные, которые в данной работе также называются оптимизационными методами. Отметим основные особенности каждой из групп.

2.4.1. Прямые методы решения обратных задач. Как было показано в начале разд. 2 требуемая характеристика процесса распыла и испарения жидкого углеводорода Z^* будет достигаться, если входные параметры модели определить прямым решением обратной задачи

$$\mathbf{X}^* = f^{-1}(\mathbf{V}^*) = f^{-1}(\mathbf{Z}^{-1}(\mathbf{Z}^*)). \tag{9}$$

При возможности непосредственного решения уравнения (2) данный подход будет наиболее приемлемым для решения обратной задачи, поскольку отпадает необходимость многократного решения прямой задачи. Однако прямые методы часто оказываются неустойчивыми. Либо требуют обращения матриц очень большого размера, возникающих при дискретизации уравнения (2).

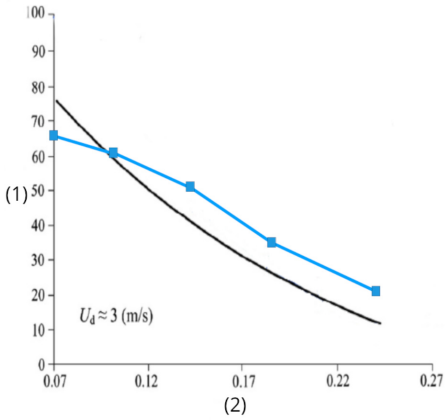


Рис. 7. Сравнение степеней испарения,
полученных экспериментально (черная линия) [14]
и численно (синяя линия с квадратами) [15];
(1) — $\Delta R\,(\%)$; (2) — $R_d\,(\text{мм})$

2.4.2. Оптимизационные методы решения обратных задач. При невозможности непосредственного решения уравнения (2) решение обратной задачи сводят к задаче минимизации

$$\min_{\mathbf{Y}} F_1, \ldots, \min_{\mathbf{Y}} F_L. \tag{10}$$

где

$$\mathbf{F} = \mathbf{Z}^* - \mathbf{Z}\,(f(\mathbf{X})) = (F_1, \ldots, F_L).$$

Метод, схематично описанный уравнениями (3), называется оптимизационным или итерационным методом решения обратной задачи. Если в прямых методах требуется установить связи между параметрами и улучшаемыми характеристиками. То в оптимизационных методах из-за необходимости многократного решения прямой задачи важно выбрать подходящий (быстрый) метод для её решения. Также, немаловажно подобрать эффективные функционалы и ограничения, которые обеспечат наилучшую сходимость к глобальному экстремуму. Оптимизационные методы решения обратных задач по сравнению с прямыми методами незначительно зависят от конкретики задачи, поэтому подходят для решения классов задач из различных областей. Такая универсальность оптимизационных методов позволила применить для решения рассматриваемой в настоящей статье обратной задачи распыла и испарения сырья в реакторе производства технического углерода разработанный ранее при участии одного из соавторов оптимизационный метод и программный код для его реализации [2]. Два класса методов образуют семейство оптимизационных методы решения обратных задач. Это – детерминированные и стохастические методы. Особенностью детерминированного алгоритма является его свойство получать один и тот же результат для одних и тех же исходных данных. Стохастические методы предполагают вероятностный характер используемого алгоритма. И те, и другие подразделяются на одноцелевые и многоцелевые оптимизационные методы. Решением многоцелевой задачи является множество оптимальных решений, называемое фронтом Парето, каждое из которых лучше любого другого по крайней мере по одному целевому функционалу и не улучшаемо одновременно по всем функционалам. Наиболее популярным стохастическим методом является эволюционный генетический алгоритм (ГА) [2]. ГА применим для решения многоцелевых задач, не требует гладкости целевых функционалов, не стопориться в локальных экстремумах, поскольку осуществляет поиск оптимального решения, одновременно анализируя множество текущих наборов параметров, которые эволюционируют от поколения к поколению в соответствии с установленными правилами. Возможно распараллеливание расчёта.

2.5. Многоцелевая оптимизация

2.5.1. Определения понятия многокритериальной (многоцелевой) оптимизации.

Определение 1. Многокритериальная оптимизация — процесс одновременной оптимизации двух или более конфликтующих целевых функций в заданной области определения.

Определение 2. Не существует единого мнения, что следует считать наилучшей альтернативой в задаче с несколькими целевыми функциями, которые противоречивы и достигают максимума в различных точках множества альтернатив. Поэтому оценка качества системы в случае векторного показателя качества является одной из главных проблем.

Определение 3. В случае нескольких целевых функций, которые оптимизируются одновременно, находятся оптимальные компромиссы между конкурирующими целевыми функциями.

Определение 4. Многоцелевая оптимизация относится к процессу одновременной оптимизации двух или более конфликтующих целей с учётом определённых ограничений. Должны быть сбалансированы несколько целей. В отличие от одноцелевой оптимизации, которая фокусируется на одной цели, многоцелевая оптимизация стремится найти набор оптимальных решений, известных как оптимальные решения по Парето, где ни одна цель не может быть улучшена без ухудшения другой.

2.5.2. Постановка задачи многоцелевой оптимизации. Задача МО формулируется следующим образом. Найти значения параметров $\mathbf{Y} = (y_1, \ldots, y_s) \subset \mathbf{X}$, обеспечивающих минимальные значения L функционалов:

$$\min_{\mathbf{Y}} F_1, \ \ldots, \ \min_{\mathbf{Y}} F_L, \tag{11}$$

при наличии фазовых ограничений:

$$\mathbf{Y} = \{y_i \mid y_{L,i} \leqslant y_i \leqslant y_{R,i}\} \tag{12}$$

и целевых ограничений:

$$\varphi_i \leqslant 0, \quad j = 1, \ldots, L.$$

2.5.3. Шаги эволюционного генетического алгоритм решение задачи многоцелевой оптимизации. Стохастический эволюционный оптимизационный генетический алгоритм (ГА) многоцелевой оптимизации, описывает эволюцию популяции индивидуумов в течение нескольких поколений [16–18]. Изменения популяции индивидуумов в процессе смены поколений подчиняются законам искусственного отбора, подобным законам теории естественного отбора Дарвина. Индивидуумом называется набор параметров $\mathbf{Y} = (y_1, \ldots, y_s) \subset \mathbf{X}$, определяющих процесс образования технического углерода в реакторе. ГА состоит из следующих этапов (шагов).

Начальная популяция индивидуумов. Работа ГА начинается с формирования начальной популяции, отбор p_0 индивидуумов которой происходит случайным образом (formed randomly). В начальную популяцию включается индивидуум, соответствующий штатному режиму работы реактора.

Целевые функционалы $f_1, \ldots, f_L$ для каждого индивидуума популяции. Для каждого индивидуума построенной популяции вычисляются значения целевых функционалов и ограничений.

Ранг индивидуума популяции.
Для последующего отбора наилучших индивидуумов на основе значений целевых функционалов рассчитывается ранг индивидуума, характеризующий его качество [16]. Индивидууму, для которого ни один из индивидуумов популяции не лучше его по всем функционалам присваивается ранг равный 1. Ранг остальных индивидуумов вычисляется по формуле

$$\mathrm{rank}(\mathbf{Y}^i) = 1 + a_i,$$

где a_i — число индивидуумов текущей популяции, лучших по всем функционалам индивидуума $\mathbf{Y}^i$. Чем больше ранг индивидуума, тем он дальше от фронта Парето. При решении задачи (11) индивидуумы должны удовлетворять ограничениям (12). При создании популяции не все индивидуумы им удовлетворяют. Ранг таким индивидуумам назначается в зависимости от того, насколько сильно не выполняются ограничения. Ранг лучшего из группы решений, для которых не выполняется хотя бы одно из ограничений, больше, чем самый высокий из группы индивидуумов, для которых ограничения выполнены.

Критерий качества индивидуума F_r, основанный на его ранге.
Для каждого индивидуума популяции вычисляется критерий качества, основанный на ранге:

$$F_r(\mathbf{Y}^i) = 1 + \sum_{k=1}^{\mathrm{rank}(\mathbf{Y}^i)-1} \eta(k),$$

где $\eta(k)$ — число индивидуумов ранга k.

Расстояния ρ между индивидуумами.
Расстояние между индивидуумами вычисляется в пространстве функционалов по формуле:

$$\rho(i,j) = \max_{k=1,\dots,K} f_k(\mathbf{Y}^i) - f_k(\mathbf{Y}^j).$$

Нишевое число m_i индивидуума.
Нишевое число m_i — это оценка того, как много индивидуумов популяции располагается в окрестности (нише) индивидуума i. Вычисляется по всей популяции

$$m_i = \sum_{j \in \mathrm{Pop}} \mathrm{Sh}(\rho(i,j)),$$

где $\rho(i,j)$ — расстояние между индивидуумами $\mathbf{Y}^i$ и $\mathbf{Y}^j$ а $\mathrm{Sh}(\rho)$ — функция разделения такая, что $\mathrm{Sh}(\rho) = 1$, $\mathrm{Sh}(\rho \geqslant \sigma_{\mathrm{shape}}) = 0$,

$$\mathrm{Sh}(\rho) = \begin{cases} 1 - \rho/\sigma_{\mathrm{shape}}, & \rho < \sigma_{\mathrm{shape}}, \\ 0, & \rho \geqslant \sigma_{\mathrm{shape}}, \end{cases}$$

где σ_{shape} — подбираемый эмпирически параметр разделения.

Функция качества F_s
Функция качества определяется следующим образом: $F_s = F_r \cdot m$. Индивидуумы, находящиеся на расстоянии σ_{shape}, увеличивают свои функции качества и сходимость происходит в нише радиуса σ_{shape}. Сходимости всей популяции не случается. Целевые функционалы нормируются и область поиска X отображается в гиперкуб с единичным ребром $[0,1]^L$.

Отбор.
Выбирается доля Tr индивидуумов, которым соответствуют наименьшие значения функции

качества F_s, $0 < \mathrm{Tr} < 1$. При этом часть популяции распределяется около некоторого числа различных пиков в пространстве поиска X. Около каждого пика располагаются индивидуумы в количестве, пропорциональном высоте пика [17]. Остальные индивидуумы равномерно распределяются вдоль фронта Парето [18].

Рекомбинация.
Из отобранных $T_r \cdot p$ индивидуумов случайным образом выбираются два идивидуума-родителя $\mathbf{x} = (x_1, \ldots, x_N)$ и $\mathbf{y} = (y_1, \ldots, y_N)$, которые производят новый индивидуум $\mathbf{w} = (w_1, \ldots, w_N)$ по формуле $w_i = x_i + \alpha_i(y_i - x_i)$, где α_i — случайное число между d и $1+d$. Параметр d называется параметром рекомбинации. Необходимо отметить, что α_i может быть больше единицы и меньше нуля, так что рекомбинация включает в себя элемент экстраполяции. На этапе рекомбинации число индивидуумов восстанавливается до p.

Мутация.
Все индивидуумы слегка меняются следующим образом:

$$w_i = w_i \pm \mu(w_{L,i} - w_{R,i})\delta,$$

где $\mu \in [0, 1]$ – мутационный параметр, $\delta = 2^{-16\gamma}$, а число γ — случайное число между 0 и 1.

Клонирование.
Без изменения из предыдущего поколения копируются в новое поколение все индивидуумы, удовлетворяющие ограничениям и имеющие ранг 1.

Переход на шаг 2, пока не будет рассчитано заданное число поколений N_{Gen}.

3. Расчёты

3.1. Результаты расчётов прямой задачи

3.1.1. Расчётная область и сетка. Моделирование выполняется в 60°C секторе реактора с одной форсункой (см. рис. 8) при предположении, что картины взаимодействия сырья с теплоносителем и испарения сырья в остальных пяти сегментах реактора такие же, как в рассматриваемом.

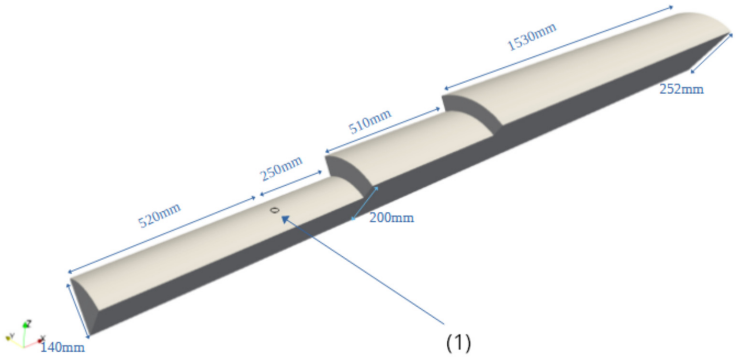


Рис. 8. Уменьшенная расчётная область реактора:
предполагается осевая периодичность потока 60 градусов;
(1) — положение сопла (диаметр 2.8 мм)

На боковых гранях сектора задаются условия симметрии:
1. отсутствует нормальная к границе компонента скорости;
2. нет прилипания на данной границе, то есть поток ничто не тормозит;

3. тангенциальная компонента скорости на границе равна скорости в приграничной ячейке.

Сетка (см. рис. 9) была адаптирована один раз (не динамически) вблизи форсунки и содержит около 190 000 ячеек.

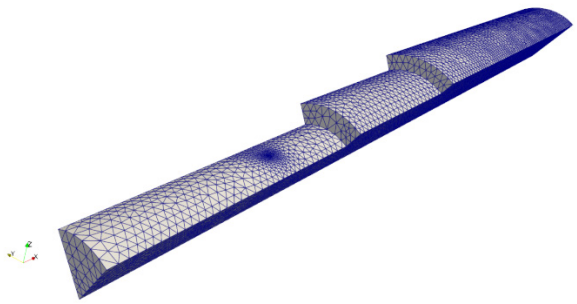


Рис. 9. Статически адаптированная сетка в 60-градусном циклическом сегменте потока

3.1.2. Давление насыщения. Давление насыщения в уравнении (8) P^v_{sat} рассматривается как функция температуры жидкой фазы. Поведение кривой давления насыщения обуславливает интенсивность испарения частиц сырья: кривая с более сильным ростом обуславливает более интенсивное испарение. Зависимость между температурой и давлением насыщения была установлена, как на рис. 10.

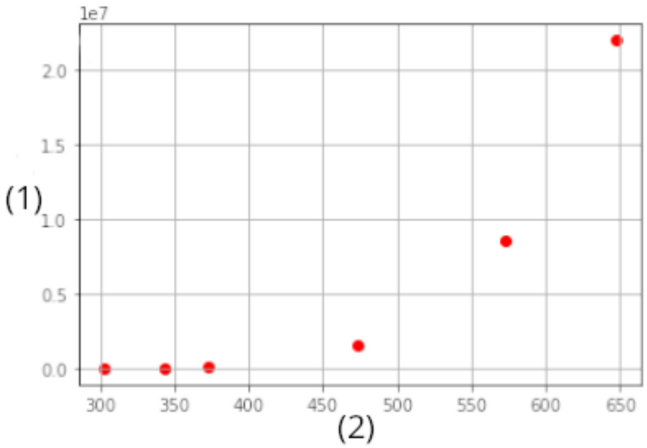


Рис. 10. Зависимость между давлением насыщения P^v_{sat} (Па) — (1) и температурой T_c (К) — (2)

3.1.3. Средний диаметр капель (характерный размер частиц дисперсной фазы). Для замыкания эйлеровой модели (Eulerian), являющейся одним из трёх эйлерово-эйлеровых подходов к описанию многофазных течений в ПК ANSYS, требуется значение среднего диаметра капель жидкой фазы d (характерный размер частиц дисперсной фазы). На рис. 11 приведена рассчитанная нами зависимость между степенью испарения жидкой фазы и характерным размером частиц дисперсной фазы d. На основе приведённой зависимости в дальнейшем в Eulerian модели мы в качестве характерного размера частиц задавали $d = 1.4$ мм, который соответствует степени испарения 64%, полученной на этой же задаче в ПК FlowVision [19].

3.1.4. Сходимость решения прямой задачи по времени. Для верификации численного решения прямой задачи была изучена сходимость решения численной модели по времени

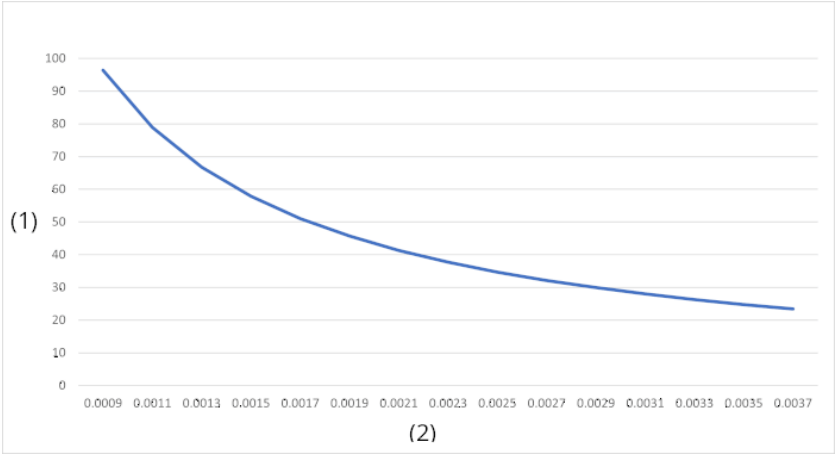


Рис. 11. Зависимость между степенью испарения (%) — (1)
и средним диаметром капли d (мм) — (2)

к стационарному состоянию. На рис. 12 продемонстрирована сходимость распределения давления вдоль оси реактора. Приведённые результаты численных исследований свидетельствуют об установлении решения нестационарной задачи при различных начальных данных к единственному стационарному решению. Таким образом, показано свойство разработанной численной модели надёжно получать единственное стационарное решение методом установления

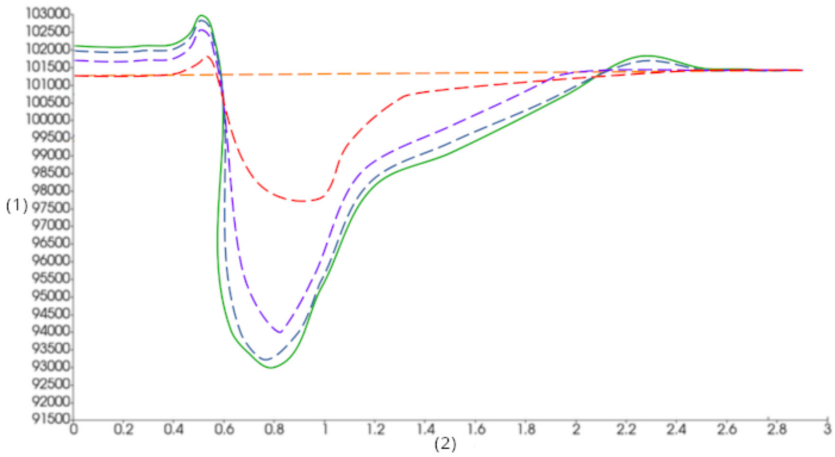


Рис. 12. Сходимость распределения давления (Па) — (1) вдоль оси реактора (м) — (2).
Цвет обозначает временные шаги:
оранжевый — начальный; красный — 100 шагов; фиолетовый — 400 шагов;
синий — 800 шагов; зеленый — 966 шагов (установившийся режим)

3.1.5. Результаты моделирования процесса производства технического углерода. Модели эйлерово-эйлерова подхода многофазных течений жидкости можно условно отнести к двум классам по их способности описывать первичный распад струи жидкости в потоке газа. Особенность (явление) первичного распада жидкой фазы в нашей задаче возникает в окрестности форсунки в момент, когда сырьё вбрызгивается в поток газа.

В [19] эта же задача в такой же трёхмерной постановке численно решается в приближении эйлерово-эйлерова подхода, но методом, основанным на конвективно-диффузионных уравнениях для концентрации, массы и импульса частиц. Используемая в [19] модель описывают эволюцию уже существующей дисперсной фазы. Но её зарождение в момент первичного распада жидкости эта модель не описывает.

В [19] для старта численного метода задаётся искусственное распределение диаметров капель на форсунке, построенное на основе экспериментально полученных данных, которые связывают объёмное распределение капель по их диаметрам. В [19] основанная на конвективно-диффузионных уравнениях для концентрации, массы и импульса частиц модель реализована на платформе FlowVision для моделирования процесса распыла и испарения жидких углеводородов в реакторе технического углерода. Модель включает две фазы: дисперсную фазу, представляющую распылённые жидкие капли углеводорода, и несущую фазу, состоящую из смеси газов (теплоноситель и продукты испарения жидкости). Движение фазы-теплоносителя описывается уравнениями Навье — Стокса, а конвективно-диффузионные уравнения концентрации частиц, импульса и энергии используются для описания динамики дисперсной фазы.

Используемая нами Eulerian модель из ПК ANSYS также принадлежит эйлерово-эйлерову классу моделей, но в отличии от модели [19] обладает способностью описывать первичный распад струи жидкости в потоке газа. Это подтверждено решениями тестовых задач в разделах «Распыл воды в потоке воздуха» и «Распыл керосина в камере сгорания газовых турбин». Далее приводятся сравнения картин течений, полученных в [19] и в настоящей работе по двум выше описанным моделям. Картины течений показаны в плоскости симметрии сектора реактора.

На рис. 13–15 представлены распределения объёмных долей сырья, массовых долей испарившегося сырья и температур несущей фазы, соответственно. Вверху на всех рисунках приведены данные из [19], а внизу — полученные в настоящей работе.

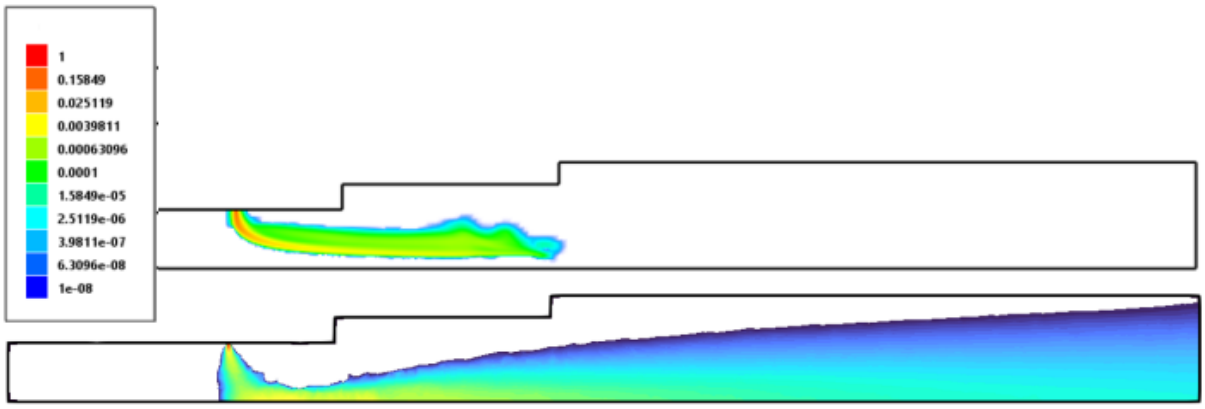


Рис. 13. Распределения объёмных долей исходного сырья в продольном сечении: верхняя часть — результат из [19]; нижняя часть — результат настоящей работы

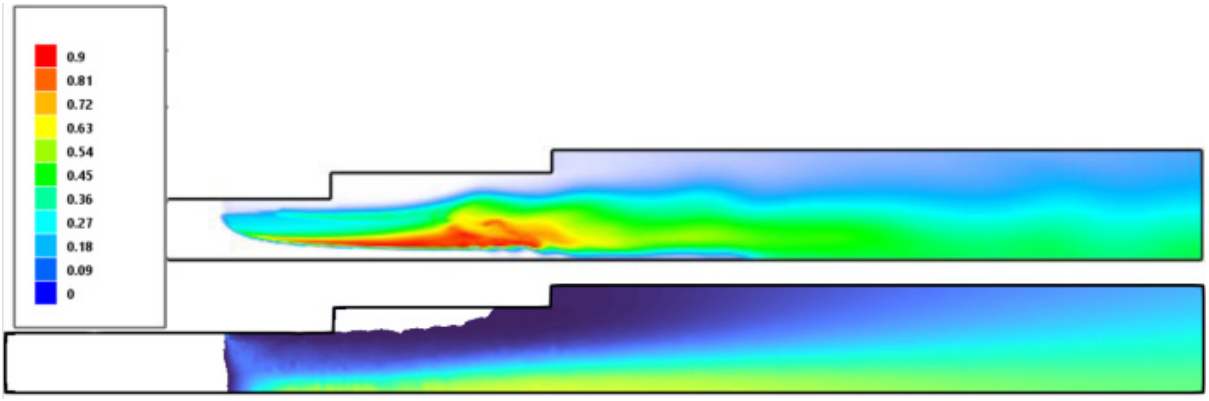


Рис. 14. Распределения массовой доли испарённого исходного сырья в продольном сечении: верхняя часть — результат из [19]; нижняя часть — результат настоящей работы

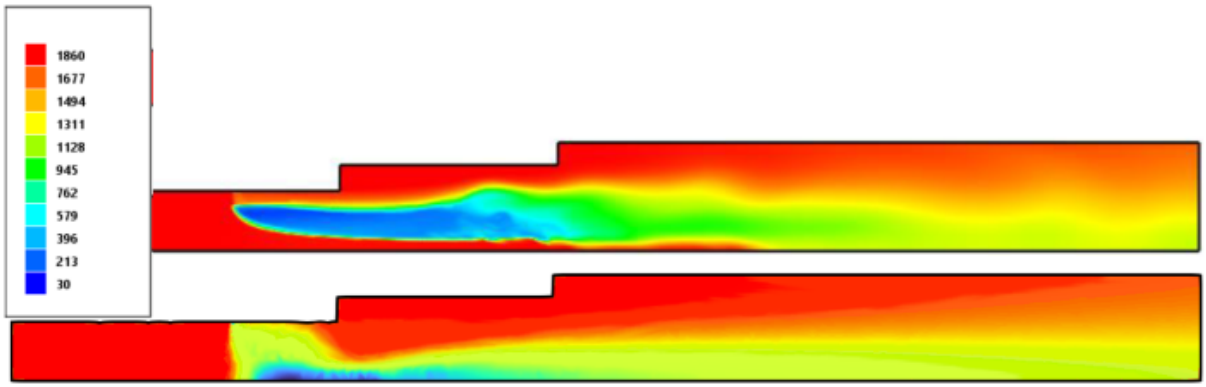


Рис. 15. Распределения температуры газа в продольном сечении:
верхняя часть — результат из [19]; нижняя часть — результат настоящей работы

При визуализации распределения объёмной доли сырья области, в которых её значения были меньше величины 0,1% не раскрашивались. Зона максимальной массовой доли пара наблюдается вблизи области концентрации сырья. Из распределения температуры газа видно, что максимальная температура газа 1860° C наблюдается на входе реактора, средняя температура 990° C имеет место быть на выходе. Минимальные значения около 30° C соответствуют области основной струи сырья с максимальным содержанием его пара. Степень испарения сырья, рассчитанная по изменению его массового расхода на входе и выходе, составляет 64% в обоих сопоставляемых расчётах.

3.1.6. Поиск входных параметров задачи распыла и испарения сырья в реакторе, оказывающих значительное влияние на её решение. Степень испарения сырья в реакторе $Z_1 = \dfrac{m_1 - m_2}{m_1}$, где m_1 — массовый расход сырья на форсунке, m_2 — массовый расход сырья на выходе из реактора и масса неиспарившегося сырья в тонком слое области реактора в окрестности его стенки Z_2 являются важнейшими характеристиками работы реактора.

Контроль за степенью испарения Z_1 необходим для недопущения наличия неиспарившихся жидких капель сырья после начала пиролиза — при высокой температуре они превратятся в кокс, загрязняющий технический углерод. Осевшее на стенках реактора неиспарившееся сырьё также превращается в загрязняющее технический углерод кокс. Минимизация функции Z_2 будет обуславливать нулевой контакт неиспарившегося сырья со стенкой реактора.

В связи со значимостью этих функций для решаемых оптимизационных задач на рис. 16–19 рассмотрены зависимости функционала Z_1.

На рис. 20–23 зависимости функционала Z_2 от входных параметров задачи: скорости подачи сырья через форсунку y_1; скорости подачи в реактор газа-теплоносителя y_2; температуре подаваемого сырья y_3; температуре подаваемого газа-теплоносителя y_4.

Из приведённых на этих рисунках зависимостей следует, что четыре рассмотренных входных параметра $\mathbf{Y} = (y_1, \ldots, y_4)$ из множества $N > 4$ всех входных параметров прямой задачи $\mathbf{X} = (x_1, \ldots, x_n)$ оказывают наибольшее влияние на степень испарения сырья Z_1 и на массу неиспарившегося сырья в тонком слое у стенки реактора Z_2.

Поэтому в работе ставятся и решаются обратные двухцелевые оптимизационные задачи распыла и испарения сырья в реакторе, в которых в качестве целевых функционалов берутся функции Z_1 и Z_2, а в качестве индивидуума в ГА – вектор $\mathbf{Y} = (y_1, \ldots, y_4)$.

Заданы следующие границы диапазонов варьирования входных параметров:

$$\begin{gathered} 20\,\text{м/с} \leqslant y_1 \leqslant 35\,\text{м/с}, \quad 350\,\text{м/с} \leqslant y_2 \leqslant 500\,\text{м/с}, \\ 15^\circ\,\text{C} \leqslant y_3 \leqslant 40^\circ\,\text{C}, \quad 1500^\circ\,\text{C} \leqslant y_4 \leqslant 2250^\circ\,\text{C}. \end{gathered} \tag{13}$$

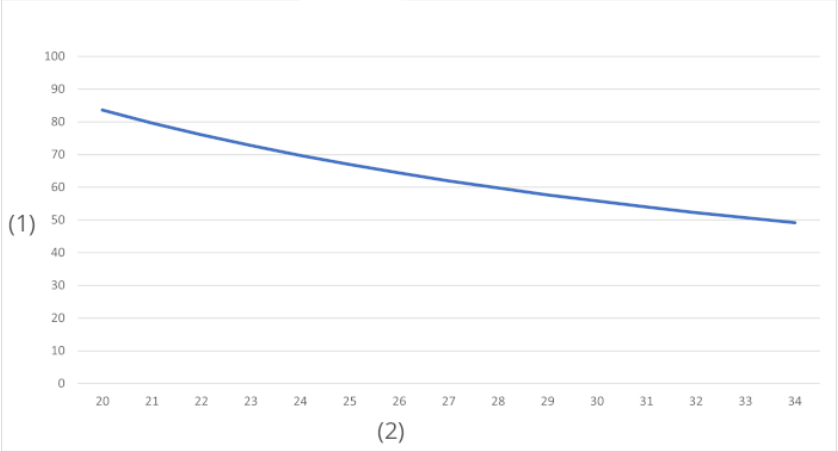


Рис. 16. Ось (1) — степень испарения $Z_1(\%)$,
ось (2) — скорость исходного сырья на сопле y_1 (м/с)
($y_2 = 422$ м/с, $y_3 = 30°$C, $y_4 = 1860°$C)

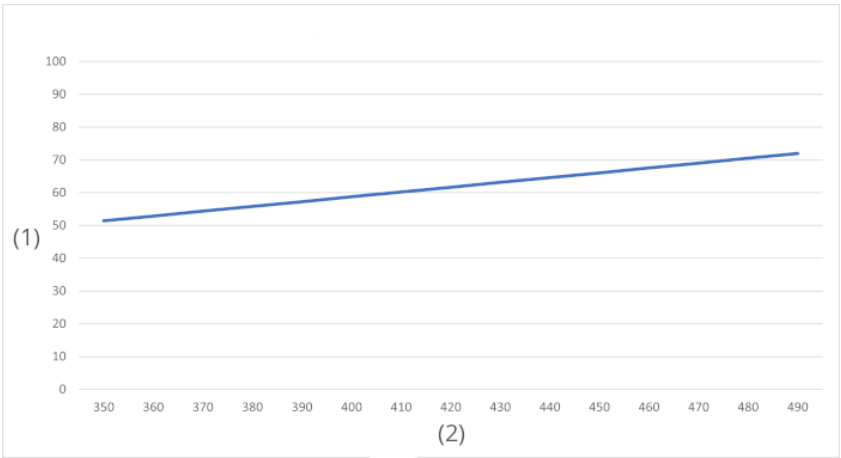


Рис. 17. Ось (1) — степень испарения $Z_1(\%)$,
ось (2) — скорость газа-носителя на входе в реактор y_2 (м/с)
($y_1 = 27$ м/с; $y_3 = 30°$C, $y_4 = 1860°$C)

Также, рассмотрим задачи МО, среди критериев оптимизации в которых будут, в том числе, максимизации скорости подачи сырья на форсунке Z_3, среднего по площади выходного сечения реактора значения объёмной доли сырья Z_4, средней по площади выходного сечения осевой составляющей скорости сырья Z_5, среднего по площади выходного сечения значения объёмной доли несущей фазы Z_6.

3.2. Результаты расчётов обратных задач

Все рассмотренные в данном разделе оптимизационные задачи решались при фазовых ограничениях (13).

3.2.1. Одновременная максимизация степени испарения сырья Z_1 в реакторе и минимизация массы сырья, контактирующего со стенкой реактора Z_2. Цели оптимизации не являются противоречивыми (конфликтующими) и достигаются в одной точке множества альтернатив. Фронт Парето — точка, сходимость которой с ростом поколений показана на рис. 24. Индивидуум, на котором в 100-м поколении наилучшим образом удовлетворены обе цели ($Z_1 = 100\%$, $Z_2 = 0.0025$ кг), имеет следующие компоненты: (y_1, y_2, y_3, y_4) = (20 м/с, 500 м/с, 40°C, 2250°C).

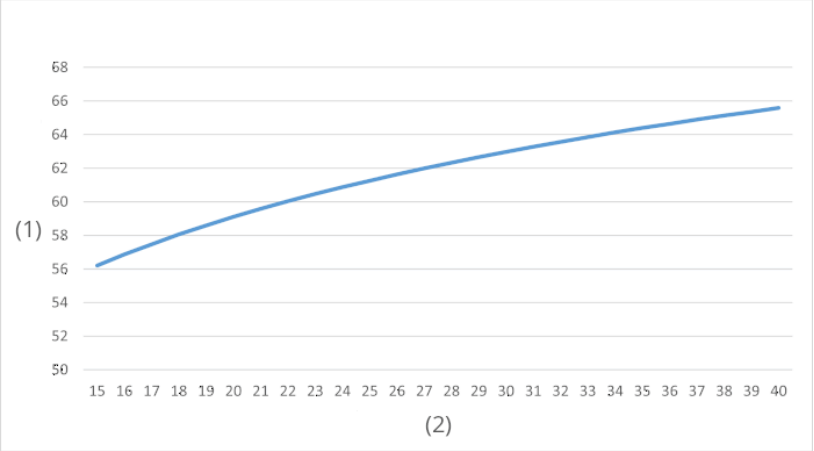


Рис. 18. Ось (1) — степень испарения $Z_1(\%)$,
ось (2) — температура исходного сырья на сопле y_3 (K)
($y_1 = 27$ м/с; $y_2 = 422$ м/с; $y_4 = 1860°$C)

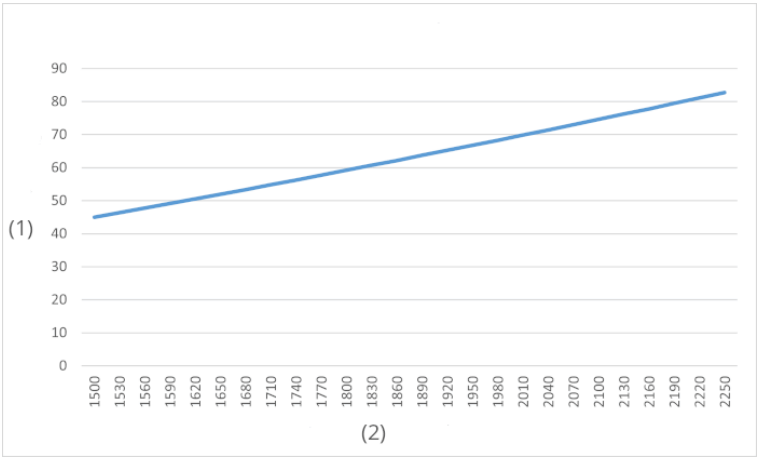


Рис. 19. Ось (1) — степень испарения $Z_1(\%)$,
ось (2) — температура газа-носителя на входе в реактор y_4 (K)
($y_1 = 27$ м/с; $y_2 = 422$ м/с; $y_3 = 30°$C)

3.2.2. Максимизация степени испарения сырья Z_1 в реакторе и максимизация скорости подачи сырья Z_3. Решая сформулированную в заголовке раздела 4.2.2 двухцелевую оптимизационную задачу, стремимся найти режим работы реактора, при котором достигаются максимальная степень испарения Z_1 и максимальная скорость сырья Z_3. на форсунке. Цели этой одновременной оптимизации предстают конфликтующими и решением данной задачи является набор оптимальных по Парето решений – кривая в плоскости переменных Z_1 и Z_3. На рис. 25 приведена сходимость с ростом поколений фронта Парето к предельному его положению.

Левый край предельного фронта — индивидуум (y_1, y_2, y_3, y_4) = (20 м/с, 500 м/с, 40°C, 2250°C) наилучшим образом удовлетворяет первую цель ($Z_1 = 100\%$). Но при этом индивидууме целевая функция $Z_3 = 20$ м/с.

Правый край предельного фронта – индивидуум (y_1, y_2, y_3, y_4) = (35 м/с, 500 м/с, 40°C, 2250°C) наилучшим образом удовлетворяет вторую цель ($Z_3 = 35$ м/с). Но значение первой целевой функции при этом индивидууме $Z_1 = 81\%$.

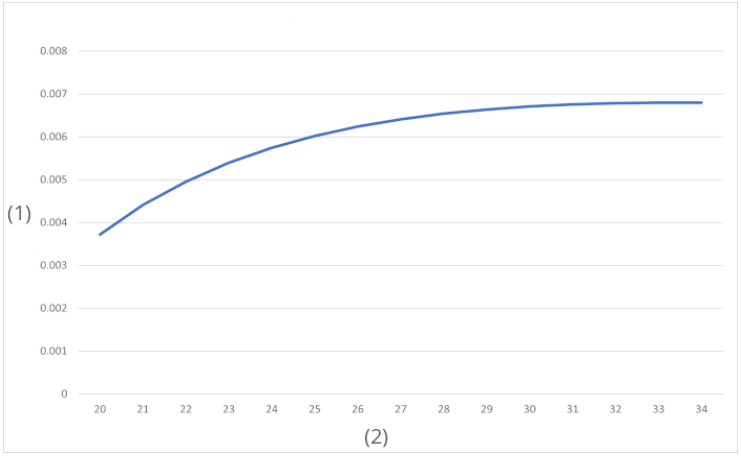


Рис. 20. Ось (1) — масса неиспарившегося исходного сырья в тонком слое у стенки реактора Z2(%), ось (2) — скорость исходного сырья на сопле y_1 (м/с) ($y_2 = 422$ м/с; $y_3 = 30°$C; $y_4 = 1860°$C)

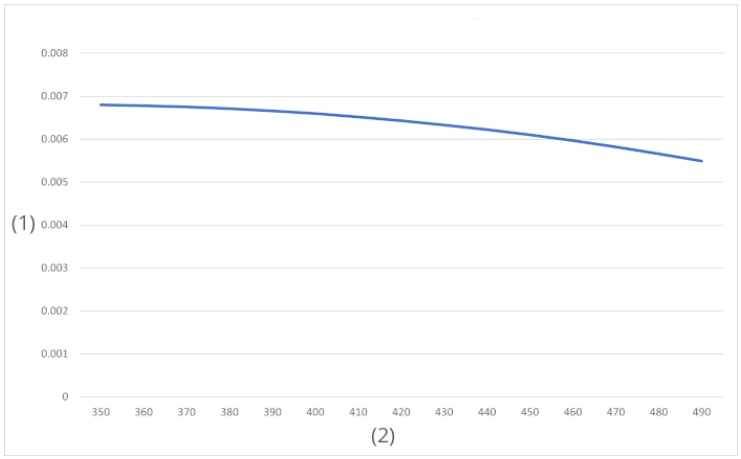


Рис. 21. Ось (1) — масса неиспарившегося исходного сырья в тонком слое у стенки реактора $Z_2(\%)$, ось (2) — скорость газа-носителя (2) на входе в реактор y_2 (м/с) ($y_1 = 27$ м/с; $y_3 = 30°$C; $y_4 = 1860°$C)

3.2.3. Максимизация степени испарения сырья Z_1 в реакторе и максимизация средней по площади выходного сечения реактора значения объёмной доли сырья Z_4. Находим режим работы реактора, при котором достигаются максимальная степень испарения сырья Z_1 и максимальное среднее по площади выходного сечения реактора значение объёмной доли сырья Z_4. Цели этой одновременной оптимизации очевидно предстают конфликтующими и решением данной задачи является набор оптимальных по Парето решений — кривая в плоскости переменных Z_1 и Z_4. На рис. 26 приведена сходимость фронта Парето с ростом поколений к предельному его положению.

Левый край предельного фронта — индивидуум (y_1, y_2, y_3, y_4) = (20 м/с, 500 м/с, 40°C, 2250°C) наилучшим образом удовлетворяет первую цель ($Z_1 = 100\%$). Но при этом индивидууме целевая функция $Z_4 = 0$.

Правый край предельного фронта — индивидуум (y_1, y_2, y_3, y_4) = (35 м/с, 350 м/с, 15°C, 1500°C) наилучшим образом удовлетворяет вторую цель ($Z_4 = 0.005$). Но значение первой целевой функции при этом индивидууме $Z_1 = 60\%$.

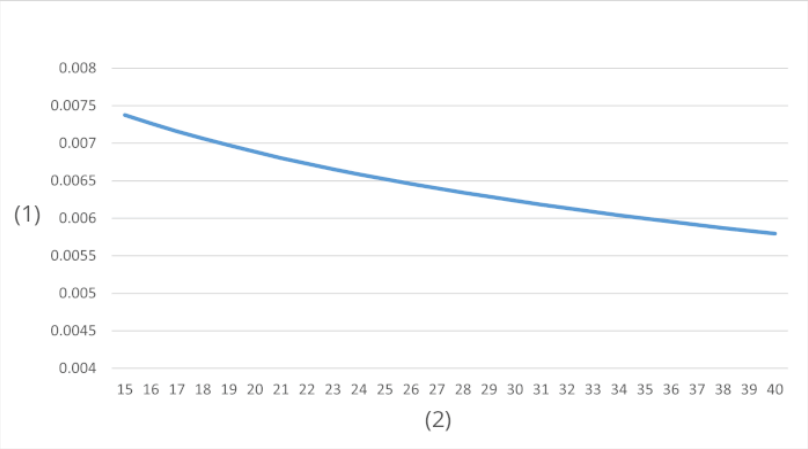


Рис. 22. Ось (1) — масса неиспарившегося исходного сырья в тонком слое у стенки реактора $Z_2(\%)$, ось (2) — температура исходного сырья (2) на сопле y_3 (K) ($y_1 = 27$ м/с; $y_2 = 422$ м/с; $y_4 = 1860°$C)

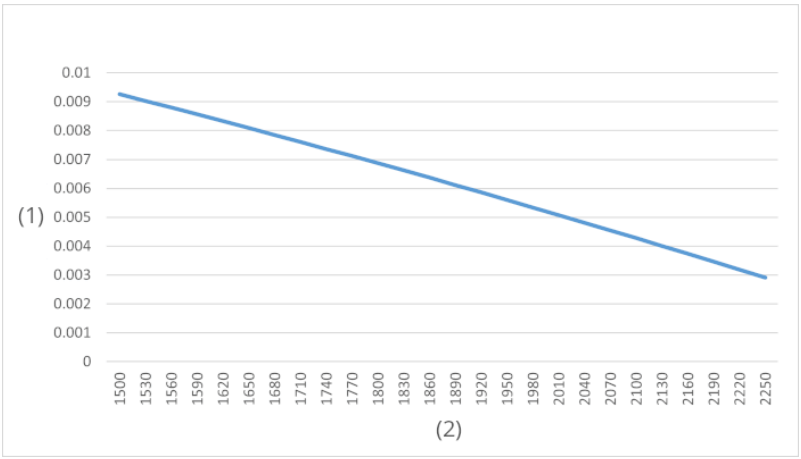


Рис. 23. Ось (1) — масса неиспарившегося исходного сырья в тонком слое у стенки реактора $Z_2(\%)$ ось (2) — температура газа-носителя (2) на входе в реактор y_4 (K) ($y_1 = 27$ м/с; $y_2 = 422$ м/с; $y_3 = 30°$C)

3.2.4. Максимизация степени испарения сырья Z_1 в реакторе и максимизация средней по площади выходного сечения реактора значения осевой составляющей скорости сырья Z_5. Ищем режим работы реактора, при котором достигаются максимальная степень испарения сырья Z_1 и максимальное среднее по площади выходного сечения реактора значение осевой составляющей скорости сырья Z_5. Цели этой одновременной оптимизации также предстают конфликтующими и решением данной задачи является набор оптимальных по Парето решений — кривая в плоскости переменных Z_1 и Z_5. На рис. 27 приведена сходимость фронта Парето с ростом поколений к предельному его положению.

Левый край предельного фронта — индивидуум (y_1, y_2, y_3, y_4) = (20 м/с, 500 м/с, 40°C, 2250°C) наилучшим образом удовлетворяет первую цель ($Z_1 = 100\%$). Но при этом индивидууме целевая функция $Z_5 = 76$ м/с. Правый край предельного фронта — индивидуум (y_1, y_2, y_3, y_4) = (29 м/с, 500 м/с, 40°C, 2250°C) наилучшим образом удовлетворяет вторую цель ($Z_5 = 76.6$ м/с). Но значение первой целевой функции при этом индивидууме $Z_1 = 85.2\%$.

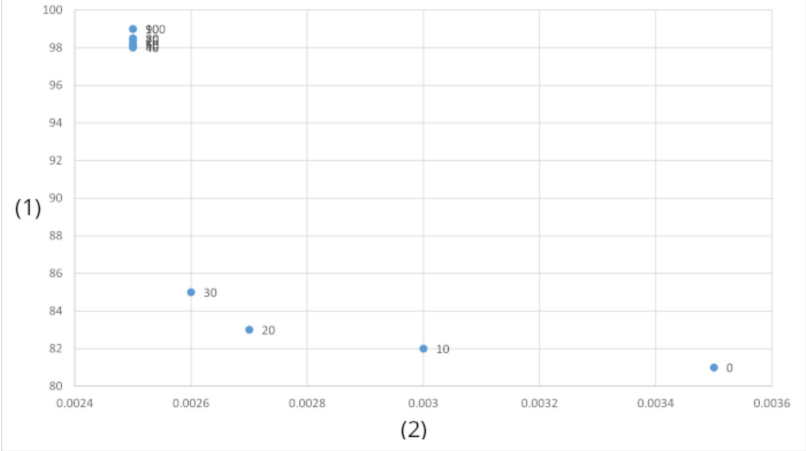


Рис. 24. Сходимость фронта Парето с увеличением поколений в задаче оптимизации $\max Z_1, \min Z_2$:
(1) — $Z_1(\%)$ степень испарения; (2) — Z_2 (кг) масса жидкости у стенки

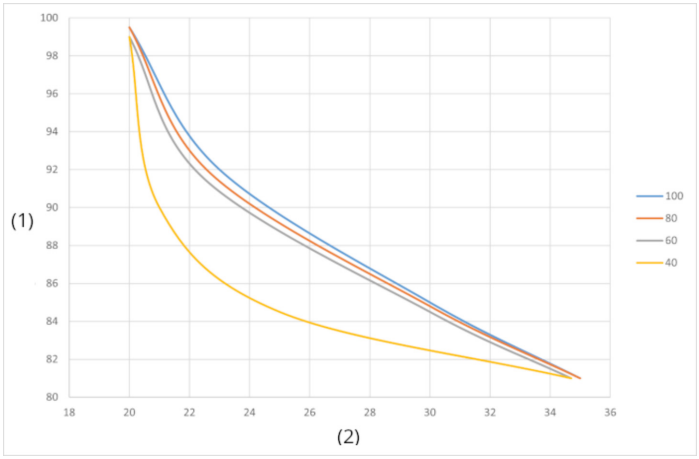


Рис. 25. Сходимость фронта Парето с увеличением поколений в задаче оптимизации $\max Z_1, \max Z_3$:
(1) — $Z_1(\%)$ степень испарения; (2) — $Z_3(\mathrm{m/s})$ скорость подачи сырья

3.2.5. Максимизация среднего по выходному сечению реактора значения объёмной доли сырья Z_4 и максимизация среднего по площади выходного сечения значения объёмной доли несущей фазы Z_6.

Максимизируем среднее по выходному сечению реактора значение объёмной доли сырья Z_4 и среднее по площади выходного сечения значения объёмной доли несущей фазы Z_6. На рис. 28 приведена сходимость фронта Парето с ростом поколений к предельному его положению.

Левый край предельного фронта – индивидуум (y_1, y_2, y_3, y_4) = (35 м/с, 350 м/с, 15°C, 1500°C) наилучшим образом удовлетворяет первую цель ($Z_4 = 0.005$). Но при этом индивидууме целевая функция $Z_6 = 0.995$. Правый край предельного фронта – индивидуум (y_1, y_2, y_3, y_4) = (20 м/с, 500 м/с, 40°C, 2250°C) наилучшим образом удовлетворяет вторую цель ($Z_6 = 1$). Но значение первой целевой функции при этом индивидууме $Z_4 = 0$.

3.3. Обсуждение результатов решения обратных задач

В задаче $\max\limits_{\mathbf{Y}} Z_1, \min\limits_{\mathbf{Y}} Z_2$ максимальное значение $Z_1 = 100\%$, и минимальное значение $Z_2 = 0,0025$ кг достигаются на индивидууме $(20, 500, 40, 2250)$, у которого скорость подачи

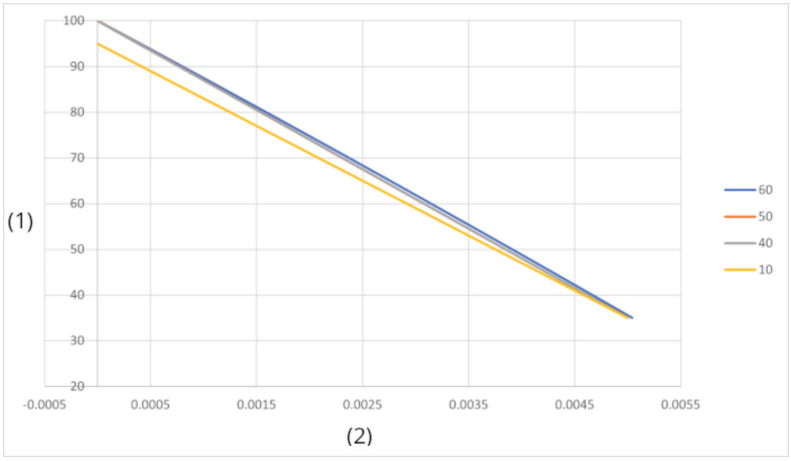


Рис. 26. Сходимость фронта Парето с увеличением поколений в задаче оптимизации $\max Z_1, \max Z_4$: (1) — $Z_1(\%)$ степень испарения; (2) — Z_4 м/с средняя по площади выходного сечения реактора значения объемной доли сырья

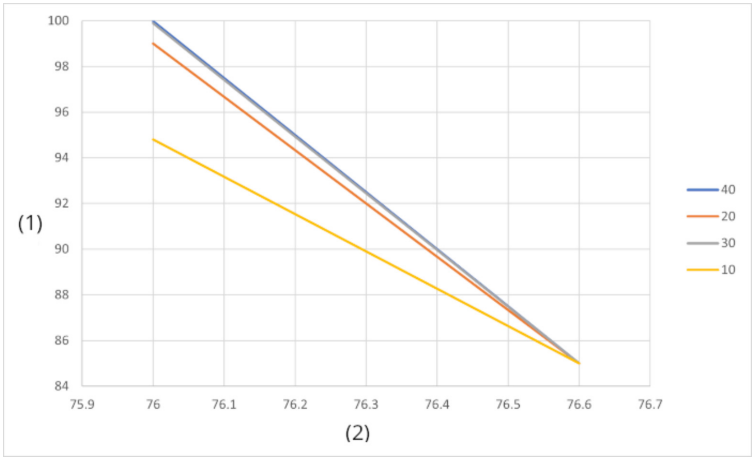


Рис. 27. Сходимость фронта Парето с увеличением поколений в задаче оптимизации $\max Z_1, \max Z_5$: (1) — $Z_1(\%)$ степень испарения; (2) — $Z_5(\mathrm{m/s})$ средняя по площади выходного сечения реактора значения осевой составляющей скорости сырья

сырья на форсунке y_1 приняла значение нижней границы диапазона её варьирования. Остальные компоненты индивидуума совпали с верхними границами диапазонов их варьирования [13]. Полученный результат согласуется с данными анализа чувствительности решения задачи к входным параметрам: для Z_1 это видно из рис.16–19, а для Z_2 — из рис. 20–23.

Из зависимости Z_1 от y_1, приведённой на рис. 16, предсказуемо смотрится решение задачи $\max\limits_{\mathbf{Y}} Z_1, \max\limits_{\mathbf{Y}} Z_3$ Но, что важно. Если на указанной зависимости при максимальном значении $y_1 = 35$ м/с величина Z_1 равна около 50%, то оптимизационный алгоритм подобрал значения остальных параметров индивидуума y_2, y_3, y_4 такими, что величина Z_1 стала равна 81%.

Во всех задачах, кроме $\max\limits_{\mathbf{Y}} Z_1, \max\limits_{\mathbf{Y}} Z_5$, на краях найденных фронтов Парето индивидуумы имеют компоненты, совпадающие со значениями границ диапазонов варьирования этих компонент.

В двухцелевой задаче $\max\limits_{\mathbf{Y}} Z_1, \max\limits_{\mathbf{Y}} Z_5$, первая цель которой максимизация степени испарения сырья Z_1, а вторая — максимизация среднего по площади выходного сечения реактора

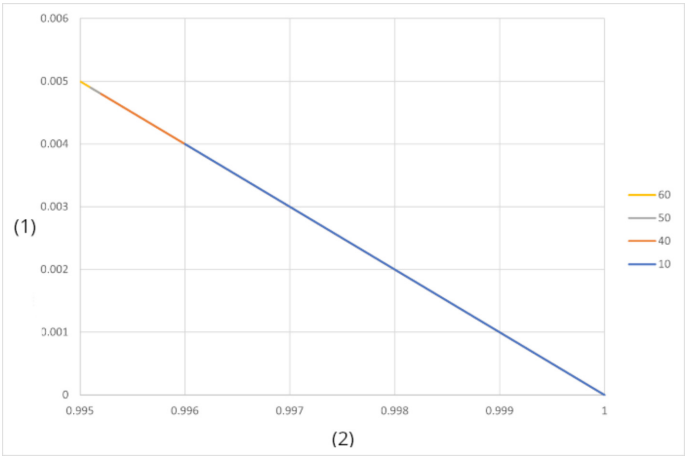


Рис. 28. Сходимость фронта Парето к его предельному положению с увеличением поколений в задаче оптимизации $\max Z_4, \max Z_6$:
(1) — Z_4 (м/с) средняя по площади выходного сечения реактора значения объемной доли сырья;
(2) — Z_6 (м/с) средняя по площади выходного сечения значения объемной доли несущей фазы

значения осевой составляющей скорости сырья Z_5, индивидуум на правом краю предельного фронта Парето (y_1, y_2, y_3, y_4) = (29 м/с, 500 м/с, 40°C, 2250°C). Его первая компонента — скорость подачи сырья на форсунке y_1 имеет значение, далёкое как от нижней (20 м/с), так и от верхней (35 м/с) границ диапазона её варьирования. Остальные компоненты индивидуума совпали с верхними границами диапазонов их варьирования [13]. Это свидетельствует о работоспособности ГА осуществлять поиск глобальных экстремумов многоцелевых оптимизационных задач. Тем самым, можно констатировать, что предложенный оптимизационный метод решения трёхмерных обратных задач моделирования процесса распыла и испарения жидкого углеводородного сырья в реакторе печного производства технического углерода опробован на ряде задач со сложными целевыми функциями и показал свою пригодность для их решения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе методов математического моделирования предлагается аппарат оптимизационного проектирования технологии процесса производства технического углерода. Решения многокритериальных оптимизационных задач трёхмерного моделирования процесса распыла и испарения жидкого углеводородного сырья в реакторе дают регламент работы реактора, при котором достигаются наибольшие дисперсность и структурность технического углерода при минимальном его загрязнении коксом и в то же время при достаточно высоком выходе продукта. Целевые функции определяются по численному решению прямой задачи распыла и испарения сырья. В них учитывается имеющаяся теоретическая и эмпирическая информация о влиянии параметров углеводородов в реакционной зоне на дисперсность и структурность технического углерода. Оптимизационная задача решается с помощью генетического метода. Результаты проведённых ряда численных экспериментов представлены в статье. В качестве целевых функций в решённых задачах МО рассмотрены степень испарения сырья в реакторе Z_1, масса неиспарившегося сырья в тонком слое у стенки реактора Z_2. Тонкий слой — это один слой ячеек сетки на стенке второго и третьего цилиндров. Контроль за степенью испарения Z_1 необходим для недопущения наличия неиспарившихся жидких капель сырья после начала пиролиза — при высокой температуре они превратятся в кокс, загрязняющий технический углерод. Минимизация функции Z_2 обуславливает нулевой контакт неиспарившегося сырья со стенкой реактора, в результате которого образуется кокс, загрязняющий продукт. Также,

рассмотрены задачи МО, среди целей которых ставились, в том числе, максимизации скорости подачи сырья на форсунке Z_3, среднего по площади выходного сечения реактора значения объёмной доли сырья Z_4, средней по площади выходного сечения осевой составляющей скорости сырья Z_5, среднего по площади выходного сечения значения объёмной доли несущей фазы Z_6. В качестве варьируемых параметров в задачах МО задавались скорость подачи сырья через форсунку y_1, скорость подачи в реактор газа-теплоносителя y_2, температура подаваемого сырья y_3, температура подаваемого газа-теплоносителя y_4, т. е. индивидуумом в ГА был вектор $\mathbf{Y} = (y_1, \ldots, y_4)$.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены в рамках государственного задания Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН (проект 125031904210-0). Других источников финансирования проведения или руководства данным конкретным исследованием не было.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ansys* Ansys Fluent (Version 2023). Canonsburg, PA: Ansys, Inc., 2023.
2. *Черный С.Г., Чирков Д.В., Лапин В.Н., Скороспелов В.А., Шаров С.В.* Численное моделирование течений в турбомашинах. Новосибирск: Наука, 2006.
3. *Гюльмисарян Т.Г., Капустин В.М., Левенберг И.П.* Технический углерод: морфология, свойства, производство. М.: Издательство Каучук и резина, 2017.
4. *Орлов В.Ю., Комаров А.М., Ляпина Л.А.* Производство и использование технического углерода для резин. Ярославль: Издательство Александр Рутман, 2002.
5. *Schiller L., Naumann Z.* A drag coefficient correlation // Verein Deutscher Ingenieure. 1935. V. 77. P. 318.
6. *Ranz W.E., Marshall W.R.* Vaporation from Drops, Part I // Chem. Eng. Prog. 1952. V. 48, N 3. P. 141–146.
7. *Ranz W.E., Marshall W.R.* Vaporation from Drops, Part II // Chem. Eng. Prog. 1952. V. 48, N 4. P. 173–180.
8. *Lee W.H.* A Pressure Iteration Scheme for Two-Phase Flow Modeling (LA-UR 79-975). Los Alamos, NM: Los Alamos Scientific Laboratory, 1979.
9. *Whitman W.G.* The two-film theory of gas absorption // Chem. Met. Eng. 1923. V. 29. P. 146.
10. *Черный С.Г., Тарраф Д.* Об особенностях моделирования распада струи жидкости на капли в потоке газа // Вестн. НГУ. Сер.: Информационные технологии. 2025. Т. 23, N 1. С. 67–87; DOI: 10.25205/1818-7900-2025-23-1-67-87
11. *Сипатов А.М., Карабасов С.А., Гомзиков Л.Ю., Абрамчук Т.В., Семаков Г.Н.* Моделирование процесса распыла с использованием адаптивных сеточных моделей // Вычислительная механика сплошных сред. 2015. Т. 8, No 1. С. 93–101.
12. *Wu P.K., Kirkendall K.A., Fuller R.P., Nejad A.S.* Spray structures of liquid jets atomized in subsonic crossflows // J. Propul. Power. 1998. V. 14, N 2. P. 173–182; DOI: 10.2514/2.5283
13. *Brandt M., Rachner M., Schmitz G.* An experimental and numerical study of kerosine spray evaporation in a premix duct for gas turbine combustors at high pressure // Combustion Sci. Techn. 1998. V. 138, N 1. P. 313–348; DOI: 10.1080/00102209808952074
14. *Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A.* Influence of droplet concentration on evaporation in a high-temperature gas // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2016. V. 96. P. 20–28.

15. *Cherny S.G., Zeziulin I.V., Tarraf D., Pochuev A.P., Boronenko I.S.* The direct and inverse problems of modeling the carbon black furnace production process // Euras. J. Math. Comput. Appl. 2025. V. 13, N 2. P. 13–42; DOI: 10.32523/2306-6172-2025-13-2-13-42

16. *Fonseca C.M., Fleming P.J.* Genetic algorithms for multiobjective optimization formulation, discussion and generalization // Proc. 5th Int. Conf. on Genetic Algorithms. 1993.

17. *Horn J., Nafpliotis N.* Multiobjective Optimization Using The Niched Pareto Genetic Algorithm (IlliGAL Report 93005). Urbana: University of Illinois, 1993.

18. *Goldberg D.E., Richardson J.J.* Genetic algorithms with sharing for multimodal function optimization // Proc. 2nd ICGA. 1987.

19. *Aksenov A.A., Zhluktov S.V., Kashirin V.S., Sazonova M.L., Cherny S.G., Drozdova E.A., Rode A.A.* Numerical simulation in the flowvision software of spraying and evaporation of feedstock in a heat-carrier gas flow in the furnace production of technical carbon // Comput. Research and Modeling. 2023. V. 15, N 4. P. 921–939; DOI: 10.20537/2076-7633-2023-15-4-921-939

UDC 621.45:034.3

OPTIMIZATION DESIGN OF CARBON BLACK PRODUCTION TECHNOLOGY

© 2026 **S. G. Cherny**[1a], **D. Tarraf**[2b]

[1] *Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Acad. Lavrentyev ave., 1, Novosibirsk 1630090, Russia,*
[2] *Novosibirsk State University, Pirogov st., 2, Novosibirsk 630090, Russia*

E-mails: [a]sgcherny2023@yandex.ru, [b]daniel.tarraf.93@gmail.com

Received 12.09.2025, revised 26.12.2025, accepted 13.05.2026

Abstract. This study formulates and solves multi-objective optimization problems related to modeling the spray and evaporation processes of liquid hydrocarbon feedstock in a furnace reactor used for carbon black production. The solutions define reactor operating conditions that maximize the dispersion and structural integrity of carbon black while minimizing contamination with coke and maintaining a sufficiently high product yield. Objective functions are derived from numerical solutions to the direct problem of spray and evaporation, based on a three-dimensional Eulerian model within the Euler–Euler framework for multiphase flow simulation in ANSYS. These functions incorporate both theoretical and empirical data on how hydrocarbon parameters in the reaction zone affect the dispersion and structure of carbon black. A key relationship is considered: the higher the hydrocarbon concentration in the reaction zone, the greater the structural integrity of the carbon black. One proposed objective function is the coagulation parameter of structure formation, ?, which accounts for the concentration, average diameter, and average charge of carbon black particles prior to coagulation. As ? increases, the structural integrity of the particles improves. Another objective function considered is the mean deviation of droplet sizes. Besides process temperature and initial hydrocarbon concentration, the number of aromatic rings in the average feedstock molecule also affects particle concentration and diameter before coagulation. An increase in aromatic rings leads to higher structural integrity of carbon black. The constructed objective functions also incorporate mechanisms for achieving the desired spray fineness, uniform droplet distribution, complete evaporation of feedstock, and prevention of contact between un-evaporated feedstock and the reactor lining (walls), as such contact leads to coke formation. To reach the extrema of these functionals, the velocity and temperature of the carrier gas at the reactor inlet, as well as the velocity and temperature of the injected feedstock, are varied. The optimization problem is solved using a genetic algorithm. Results of the numerical experiments are presented in the article.

Keywords: carbon black, inverse problem of spray and evaporation process in pyrolysis reactor for carbon black production.

DOI: 10.33048/SIBJIM.2026.29.309

REFERENCES

1. Ansys Ansys Fluent (Version 2023). Canonsburg, PA: Ansys, Inc., 2023.
2. Cherny S. G., Chirkov D. V., Lapin V. N., et al. Chislennoe modelirovanie techenij v turbomashinah [Numerical modeling of flows in turbomachines]. Novosibirsk: Nauka, 2006 (in Russian).
3. Gulmisaryan T.G., Kapustin V.M., Levenberg I.P. Tehnicheskij uglerod: morfologiya, svojstva, proizvodstvo [Technical carbon: morphology, properties, production]. Moscow: Kauchuk i Rezina Publ., 2017 (in Russian).

English translation is published in Journal of Applied and Industrial Mathematics, 2026, Vol. 20, No. 3.

4. Orlov V. Yu., Komarov A. M., Lyapina L. A. Proizvodstvo i ispol'zovanie tehnicheskogo ugleroda dlya rezin. [Production and use of technical carbon for rubbers]. Yaroslavl: Aleksandr Rutman Publ., 2002 (in Russian).
5. Schiller L., Naumann Z. A drag coefficient correlation. *Verein Deutscher Ingenieure*, 1935, Vol. 77, pp. 318.
6. Ranz W.E., Marshall W.R. Vaporation from Drops, Part I. *Chem. Eng. Prog.*, 1952, Vol. 48, No. 3, pp. 141–146.
7. Ranz W.E., Marshall W.R. Vaporation from Drops, Part II. *Chem. Eng. Prog.*, 1952, Vol. 48, No. 4, pp. 173–180.
8. Lee W. H. A Pressure Iteration Scheme for Two-Phase Flow Modeling (LA-UR 79-975). Los Alamos, NM: Los Alamos Scientific Laboratory, 1979.
9. Whitman W.G. The two-film theory of gas absorption. *Chem. Met. Eng.*, 1923, Vol. 29, pp. 146.
10. Cherny S.G., Tarraf D. Ob osobennostyah modelirovaniya raspada strui zhidkosti na kapli v potoke gaza [On the Features of Modeling Liquid Jet Breakup into Droplets in a Gas Flow]. *Bulletin of NSU. Series: Information Technologies*, 2025, Vol. 23, No. 1, pp. 67–87 (in Russian); DOI: 10.25205/1818-7900-2025-23-1-67-87
11. Sipatov A.M., Karabasov S.A., Gomzikov L.Yu., Abramchuk T.V., Semakov G. N. Modelirovanie processa raspyla s ispol'zovaniem adaptivnyh setochnyh modelej [Modeling of the Spray Process Using Adaptive Grid Models]. *Vychislitel'naya Mehanika Sploshnyh Sred* [Comput. Mech. Continuous Media], 2015. Vol. 8, No. 1, pp. 93–101 (in Russian); DOI: 10.7242/1999-6691/2015.8.1.8
12. Wu P.K., Kirkendall K.A., Fuller R.P., Nejad A.S. Spray structures of liquid jets atomized in subsonic crossflows // *J. Propul. Power*, 1998, Vol. 14, No. 2, pp. 173–182; DOI: 10.2514/2.5283
13. Brandt M., Rachner M., Schmitz G. An experimental and numerical study of kerosine spray evaporation in a premix duct for gas turbine combustors at high pressure. *Combustion Sci. Techn.*, 1998, Vol. 138, No. 1, pp. 313–348; DOI: 10.1080/00102209808952074
14. Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Influence of droplet concentration on evaporation in a high-temperature gas. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 2016, Vol. 96, pp. 20–28.
15. Cherny S.G., Zeziulin I.V., Tarraf D., Pochuev A.P., Boronenko I.S. The direct and inverse problems of modeling the carbon black furnace production process. *Euras. J. Math. Comput. Appl.*, 2025, Vol. 13, No. 2, pp. 13–42; DOI: 10.32523/2306-6172-2025-13-2-13-42
16. Fonseca C.M., Fleming P.J. Genetic algorithms for multiobjective optimization formulation, discussion and generalization. *Proc. 5th Int. Conf. on Genetic Algorithms*, 1993.
17. Horn J., Nafpliotis N. Multiobjective Optimization Using The Niched Pareto Genetic Algorithm (IlliGAL Report 93005). Urbana: University of Illinois, 1993.
18. Goldberg D.E., Richardson J.J. Genetic algorithms with sharing for multimodal function optimization. *Proc. 2nd ICGA*, 1987.
19. Aksenov A.A., Zhluktov S.V., Kashirin V.S., Sazonova M.L., Cherny S.G., Drozdova E.A., Rode A.A. Numerical simulation in the flowvision software of spraying and evaporation of feedstock in a heat-carrier gas flow in the furnace production of technical carbon. *Comput. Research and Modeling*, 2023, Vol. 15, No. 4, pp. 921–939; DOI: 10.20537/2076-7633-2023-15-4-921-939