

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ДЛЯ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ ИНСОЛЯЦИИ ФОТОБИОЛОГИЧЕСКОЙ АРХИТЕКТУРНОЙ ОБОЛОЧКИ

© 2016 г. П.А. Ермаченко, Н.С. Бузало, Д.С. Перевязка*

Южно-Российский государственный политехнический университет им. М.И. Платова, 346428, Новочеркасск, ул. Просвещения, 132;

*Кубанский государственный университет, 350040, Краснодар, ул. Ставропольская, 149

E-mail: neo-ecology@mail.ru

Поступила в редакцию 19.11.15 г.

Рассмотрены светопроницаемые архитектурные оболочки с микроводорослями в качестве элемента локальных фотобиологических очистных сооружений, интегрированных в городскую застройку. Сформулирована математическая модель для предсказания инсоляции и температурного режима среды с микроводорослями при их культивировании в условиях динамически меняющейся естественной освещенности. Поставлена задача оптимизации параметров фотобиологической архитектурной оболочки по температуре и инсоляции. Приведены результаты численных экспериментов для модельной задачи.

Ключевые слова: фотобиологическая архитектурная оболочка, микроводоросли, инсоляция, математическое моделирование, генеративное проектирование.

В последнее время наблюдается тенденция стремительного роста городского населения. Особенно это характерно для развивающихся стран. Распространенным является случай, когда прирост населения намного превосходит скорость строительства инженерных сетей и очистных сооружений. В частности, это обусловлено тем, что существующий уровень технологий подразумевает создание максимально централизованных систем сбора и очистки сточных вод, реконструкция которых слишком дорога для развивающихся стран.

В работе [1] рассмотрен пример локальных фотобиологических очистных сооружений, удовлетворяющих требованиям биосферной совместимости, т.е. обеспечивающих высокую степень замкнутости циклов по веществу и энергии. Предложенная система содержит блок фотобиореакторов с микроводорослями, блок минерализации с активным илом, отстойники, блок метантенков. Подразумевается наличие возможности регулирования рециркуляционных потоков между перечисленными сооружениями. Ключевым элементом системы является система фотобиореакторов с микроводорослями, которые в настоящее время рассматриваются в ка-

честве перспективного сырья для производства биотоплива третьего поколения, что позволяет обеспечить энергонезависимость локальных фотобиологических очистных сооружений. Конструкцию в виде блока фотобиореакторов, помещенных на специальный несущий каркас, накрывающий очистные сооружения, или некоторое жилое здание, мы далее будем называть фотобиологической архитектурной оболочкой (ФАО) и обозначать форму ее поверхности буквой Ω .

Эффективное использование естественного освещения является определяющим моментом для применения подобных технологий. Поэтому фотореакторы должны быть размещены под открытым небом. Однако при этом почти вся солнечная энергия, поглощенная фотобиореакторами, преобразуется в тепловую [2]. Это может легко приводить к перегреву. Кроме того, поскольку объект расположен в плотной городской застройке, то инсоляция ФАО может быть крайне неоднородной, что должно быть учтено при расчетах. В работе мы рассматриваем вопросы имитационного моделирования инсоляции и нагрева с учетом затенения от окружающей застройки, а также оптимизации формы ФАО по температуре и освещенности.

Сокращение: ФАО – фотобиологическая архитектурная оболочка.

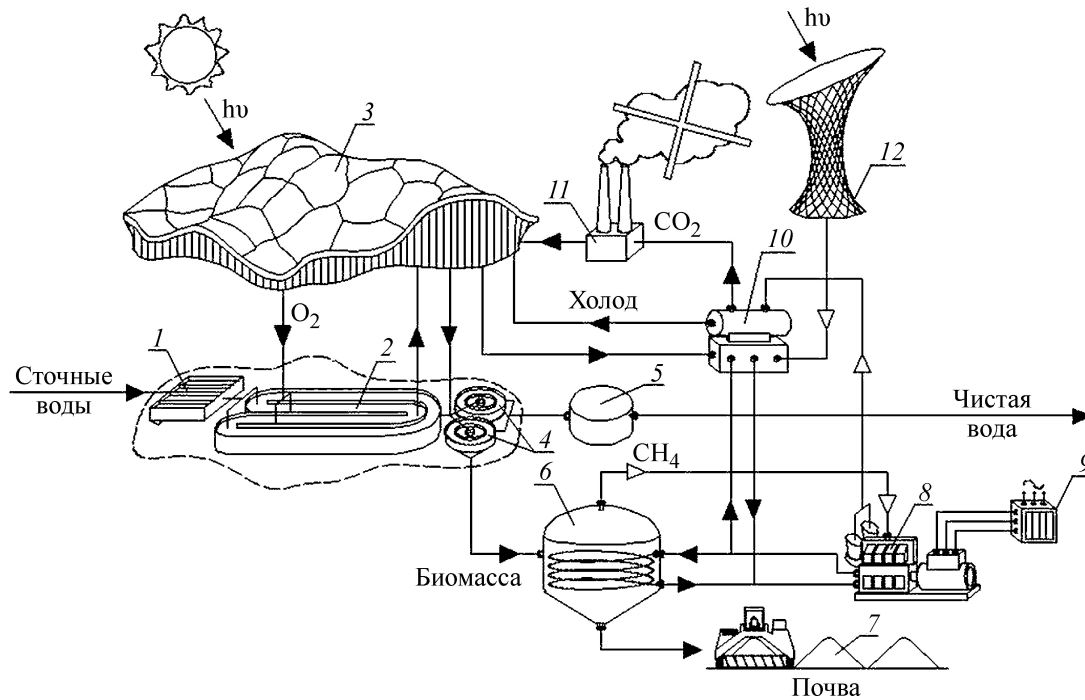


Рис. 1. Схема фотобиологических очистных сооружений: 1 – блок предварительной очистки, 2 – блок минерализации с анаэробным биореактором и аэротенком, 3 – архитектурная оболочка и интегрированными фотобиореакторами, 4 – блок доочистки, 5 – резервуар с чистой водой, 6 – метантенк, 7 – блок компостирования, 8 – когенерационная электростанция, 9 – трансформатор, 10 – чиллер, 11 – модуль очистки дымовых газов, 12 – световой коллектор.

**ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА
ФОТОБИОЛОГИЧЕСКИХ
ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

На рис. 1 изображены основные компоненты фотобиологических очистных сооружений.

В работе [3] предложена математическая модель технологической схемы с рециркуляцией воды между анаэробным биореактором, аэротенком, фотобиореактором и метантенком, описывающая динамику накопления фосфора в этой системе. Модель представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих кинетику концентраций биогенных элементов и микроорганизмов двух биоценозов – минерализатора, содержащего фосфат-аккумулирующий активный ил, и фотобиореактора с микроводорослями. В общем виде система уравнений может быть записана как

$$\frac{\partial \mathbf{C}}{\partial t} = \mathbf{F}^+(Q^{\text{in}}, Q_{\text{met}}^{\text{in}}, Q_{\text{bac}}^{\text{out}}, \mathbf{R}, \mathbf{S}^{\text{in}}, \mathbf{C}) - \mathbf{F}^-(Q^{\text{in}}, Q_{\text{met}}^{\text{in}}, Q_{\text{bac}}^{\text{out}}, \mathbf{R}, \mathbf{C}) + \mathbf{N}\boldsymbol{\mu}(\mathbf{C}, I, T), \tag{1}$$

где $\mathbf{C} = (C_1, C_2, \dots, C_{k+l+m}) = (S_1, S_2, \dots, S_k, X_1, X_2, \dots, X_l, P_1, P_2, \dots, P_m)$ – вектор концентраций, включающий: подвектора концентра-

ций растворенных веществ $\mathbf{S} = (S_1, S_2, \dots, S_k)$ и микроорганизмов $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_l)$ в аэротенке, денитрификаторе и фотобиореакторе, а также концентрации веществ, накапливаемых в клетках $\mathbf{P} = (P_1, P_2, \dots, P_m)$. Слагаемые \mathbf{F}^{\pm} описывают приток и отток субстанций и зависят от искомой концентрации и величин, характеризующих скорость потока (расход на входе в систему: сточные воды Q^{in} и возвратный поток из метантенка $Q_{\text{met}}^{\text{in}}$; объем осадка активного ила удаляемого из системы в секунду $Q_{\text{bac}}^{\text{out}}$; вектор коэффициентов рециркуляции между элементами системы \mathbf{R}). Кроме того, \mathbf{F}^+ также зависит от вектора исходных концентраций веществ в сточных водах \mathbf{S}^{in} . В последнем слагаемом уравнения (1): \mathbf{N} – матрица стехиометрических коэффициентов; $\boldsymbol{\mu}$ – вектор скоростей биохимических реакций, который является функцией искомых концентраций, температуры T и инсоляции I фотобиореактора.

Таким образом, входными данными, влияющими на процессы очистки и роста микроводорослей, являются расход сточных вод, входные концентрации веществ, температура и инсоляция фотобиореактора. Все эти функции испытывают колебания в течение суток и существенно зависят от масштаба сооружений. Од-

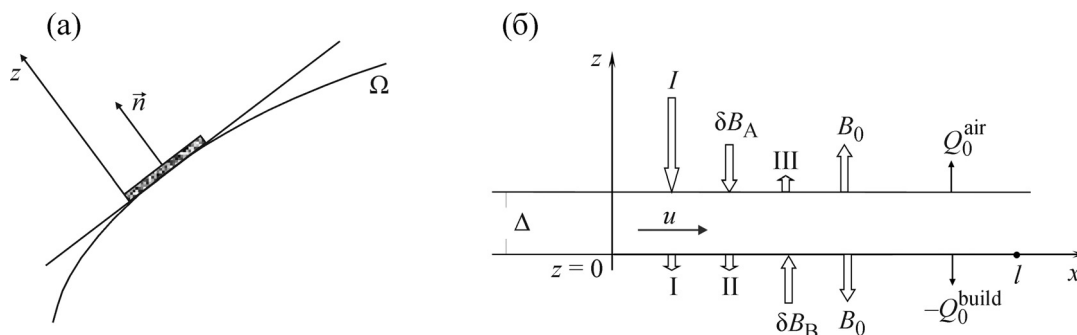


Рис. 2. Локальная система координат (а) и компоненты теплового баланса (б).

нако система может нивелировать неравномерность поступления биогенов со сточными водами за счет рециркуляционных потоков. Технологическая схема, описанная в работе [3], позволяет организовать процесс очистки в виде частично замкнутой системы, которая накапливает фосфор в биомассе с целью культивирования микроводорослей в период отсутствия поступления сточных вод. Клеточные резервы биогенных элементов и рециркуляция соединений азота и фосфора из метантенка компенсируют неравномерность нагрузки на очистные сооружения.

Температура и инсоляция могут существенно варьировать в течение как суток, так и всего года. Кроме того, предполагается, что фотобиологические очистные сооружения располагаются непосредственно в городе. Поэтому при моделировании и проектировании появляется необходимость учитывать затенение от высотных зданий (см., например, [4]). Однако в хорошо освещенной местности существует проблема чрезмерного перегрева, который влияет на скорость роста микроводорослей так же негативно, как и недостаток солнечного излучения.

В схеме фотобиологических очистных сооружений, изображенной на рис. 1, основным источником энергии является солнечный свет, который при помощи chillera и светового коллектора используется в том числе и для охлаждения ФАО. Адаптивные свойства данной схемы определяются тем, что в более солнечный день chiller способен более интенсивно охладить воду перед подачей ее в фотобиореактор.

Однако даже при наличии охлаждения, при прохождении жидкости по единичному блоку фотореактора температура среды может существенно изменяться и достигать критических значений. В работе мы исследуем возможность решения проблемы перегрева путем варьирования формы архитектурной оболочки с учетом геоинформационных данных об окружающей

застройке, толщины блоков фотобиореакторов и температуры втекающей жидкости.

ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ФОТОБИОРЕАКТОРА

Уравнение теплового баланса. Рассмотрим компоненты теплового баланса единичного модуля фотобиореактора (рис. 2). Введем систему координат так, чтобы ось z была направлена вдоль наименьшего размера – толщины фотореактора и совпадала с нормалью ФАО \vec{n} (вычисленной в точке соответствующей центру модуля).

Во-первых, на поверхность поступает поток солнечной радиации I :

$$I = I' \cos(\alpha)(1 - r_f) + i(1 - r_f). \quad (2)$$

где I' – поток прямой солнечной радиации на поверхность, перпендикулярную солнечному вектору, α – угол между солнечным вектором и нормалью поверхности фотореактора, i – поток рассеянной солнечной радиации, r_f и r – альбедо прямой и рассеянной радиации, отражательные способности поверхности фотореактора.

Во-вторых, поверхность получает тепло в виде потока инфракрасной радиации от атмосферы (δB_A) и здания, расположенного под каркасом с фотореакторами (δB_B) (B_A – поток радиации от атмосферы, B_B – от ниже расположенного здания, δ – относительный коэффициент поглощения, или поглощательная способность поверхности). Каждый фотобиореактор теряет тепло посредством собственного излучения с наружной и внутренней поверхностей B_0 .

При прохождении через толщу воды с микроводорослями каждый из потоков претерпевает изменения и преобразуется в потоки I, II, III:

$$\begin{aligned} \text{I: } & Ie^{-\Delta/\delta_1^*}, \\ \text{II: } & \delta B_A e^{-\Delta/\delta_2^*}, \\ \text{III: } & \delta B_B e^{-\Delta/\delta_3^*}, \end{aligned} \quad (3)$$

где δ_i^* – глубина, при которой поток уменьшается в e раз по сравнению с потоком на поверхности.

Обмен теплом между окружающей средой и поверхностью фотореактора обозначен на рис. 2 через противоположно направленные потоки $+Q_0^{\text{air}}$ и $-Q_0^{\text{build}}$.

По закону Ньютона–Рихмана

$$\begin{aligned} Q_0^{\text{air}} &= -\lambda \partial T / \partial z = \beta(T - T_{\text{air}}) \\ \text{и } Q_0^{\text{build}} &= -\lambda \partial T / \partial z = \beta(T - T_{\text{build}}), \end{aligned}$$

где T – температура среды в фотореакторе, T_{air} – внешняя температура, T_{build} – температура области расположенной внутри оболочки, λ – коэффициент теплопроводности, β – коэффициент теплоотдачи поверхности.

Внутри фотобиореактора тепло переносится плоскопараллельным течением со скоростью u . Горизонтальные размеры фотореактора много больше вертикальных, и адвективный перенос тепла в горизонтальном направлении превосходит диффузионный. Без учета радиационных потоков краевая задача для уравнения теплового баланса имеет следующий вид:

$$c\rho \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0, \quad (4)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial t} = \beta(T - T_{\text{air}}), \quad z = \Delta, \quad (5)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial t} = \beta(T - T_{\text{build}}), \quad z = \Delta,$$

где c – удельная теплоемкость среды, Δ – толщина фотобиореактора.

Интегрируя уравнение (4) по x и z с учетом (5) получаем

$$\begin{aligned} c\rho \Delta \frac{dT}{dt} + c\rho u \Delta (T - T_{\text{input}}) + \\ + \beta l (T - T_{\text{air}}) + \beta l (T - T_{\text{build}}) = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где T_{input} – температура на входе, l – горизонтальный размер фотобиореактора.

Добавляя потоки радиации (2) и (3) в уравнение (6), получаем уравнение теплового баланса отдельного фотобиореактора:

$$\begin{aligned} c\rho \Delta \frac{dT}{dt} + c\rho \Delta u (T - T_{\text{input}}) / l + \beta (2T - T_{\text{air}} - T_{\text{build}}) = \\ = I + \delta B_A + \delta B_B - Ie^{-\Delta/\delta_1^*} - \delta B_A e^{-\Delta/\delta_2^*} - \\ - \delta B_B e^{-\Delta/\delta_3^*} - 2B_0. \end{aligned} \quad (7)$$

Определение параметров уравнения теплового баланса. Свойства поверхности фотобиореактора. Блоки фотобиореакторов выполнены из прозрачной ETFE-мембраны, которая практически не влияет на отражательные свойства, поэтому для расчета альбеда используются данные, соответствующие поверхности воды.

Альбеда прямой радиации водной поверхности зависит от угла падения лучей и варьируется в широком диапазоне. Например, для горизонтально расположенного блока фотореактора в течение дня альбеда может изменяться от 70–80% при солнце у горизонта до 5% при высоком солнце. Расчет альбеда выполняется по формуле:

$$r_i = a + b \exp(c_\alpha \alpha),$$

где $a = 0,01997$, $b = 1,303 \cdot 10^{-5}$, $c_\alpha = 7,133$.

Вычисление потока прямой солнечной радиации. При определении потока I' необходимо учесть тени, отбрасываемые зданиями, окружающими ФАО. Поверхность разбивается на конечное число плоских полигонов и на каждом из них решается уравнение (7). Обозначим Δ_Ω – площадь полигона и Δ'_Ω – площадь тени на нем. Тогда I' с учетом затенения может быть вычислена как

$$I' = (I^{\text{max}} - i') \left(\frac{\Delta_\Omega - \Delta'_\Omega}{\Delta_\Omega} \right),$$

где I^{max} – максимальная инсоляция.

Характеристики поглощения излучения. Поглощение света в фотобиореакторе рассматривается как поглощение окрашенным раствором, согласно закону Бугера–Ламберта–Бера:

$$\delta_1^* = 1/\alpha_1 C_{\text{alg}},$$

где α_1 – коэффициент поглощения, C_{alg} – концентрация микроводорослей.

Концентрацию водорослей в фотобиореакторах поддерживают искусственно, а прирост убирают из системы. Принятая доза микроводорослей составляет $C_{\text{alg}} = 1,5$ г/л.

Что касается инфракрасного излучения, то оно практически полностью поглощается водным слоем толщиной в несколько сантиметров. При толщине фотореактора порядка 10–20 см,

коэффициенты δ_2^* и δ_3^* малы по сравнению с Δ и соответствующие слагаемые в уравнении (7) обращаются в 0.

Формулы для расчета поглощенного инфракрасного излучения от атмосферы и нижележащего здания, а также собственного излучения поверхности имеют следующий вид [5]

$$\delta B_A = \delta \sigma T_{\text{air}}^4, \quad \delta B_B = \delta \sigma T_B^4, \quad B_0 = \delta \sigma T^4,$$

где T_B – температура нижележащего здания, σ – постоянная Стефана–Больцмана, δ – поглощательная способность поверхности, $\delta = 0,7$. В формуле для δB_A не учитывается влияние водяного пара на излучение атмосферы.

Результаты численного решения уравнения теплового баланса для блоков фотобиореактора могут быть использованы для оценки температурного режима и оптимизации параметров ар-

хитектурных конструкций с микроводорослями, а также для более точного моделирования процесса роста водорослей при работе фотобиологических очистных сооружений в случае имитационного моделирования с использованием моделей типа (1).

ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ ФОТОБИОЛОГИЧЕСКОЙ АРХИТЕКТУРНОЙ ОБОЛОЧКИ

Целевой функционал. Микроводоросли рассматриваются в качестве сырья для производства биотоплива. Поэтому задача оптимизации – это максимизация функционала, описывающего суммарный прирост биомассы микроводорослей, за определенный период времени на единице площади поверхности фотобиологической архитектурной оболочки.

$$F(\Omega, T_{\text{input}}, \Delta) = \frac{1}{\int d\Omega} \int_{\Omega} \mu \left[\frac{I(x, y, z, \Omega, t)}{I(x, y, z, \Omega, t) + K_I} \exp\left(-\frac{(T(x, y, z, \Omega, T_{\text{input}}, \Delta t) - c_T)^2}{2\sigma_T^2}\right) \right] d\Omega dt, \quad (8)$$

где μ – максимальная скорость роста микроводорослей; $I(x, y, z, \Omega, t)$ и $T(x, y, z, \Omega, t)$ – освещенность и температура, являющиеся функциями времени t , координат $(x, y, z) \in \Omega$ и формы оболочки Ω ; K_I – константа полунасыщения по инсоляции; c_T – оптимальная температура; σ_T – интервал толерантности по температуре.

В уравнении (8) учтено, что для высокой освещенности происходит насыщение, а при отклонении от оптимальной температуры происходит угнетение роста водорослей [6]. Ограничения задачи являются максимальная и минимальная высоты каркаса, минимально возможная температура втекающей жидкости, двусторонние ограничения на толщину фотобиореактора. Кроме того, температура в каждой точке поверхности ФАО удовлетворяет уравнению теплового баланса (7).

При оптимизации есть серьезные ограничения на вычислительную сложность задачи, моделирующей рост водорослей. Поэтому здесь вместо моделей типа (1) мы используем упрощенную модель прироста биомассы, описывая процесс функционалом (8), аналогично уравнению [7]. Также здесь принято допущение, что спектральный состав излучения, падающего на поверхность и проникающего вглубь фотобио-

реактора, не влияет на скорость роста микроводорослей. В общем случае влияние спектрального состава излучения является очень важным фактором. Однако его роль особенно велика в пасмурную погоду, когда доля рассеянного света высока. В поставленной задаче мы рассчитываем самый жаркий и, как предполагается, безоблачный день в году. Выбранная для фотобиореакторов доза микроводорослей – 1,5 г/л. Это очень плотная и практически непроницаемая для света преграда уже при толщине слоя 50 мм. Поэтому примерно 95% излучения будет уходить на нагрев, таким образом, ингибирование скорости роста будет связано с высокими температурами. Чтобы нивелировать возможность перегрева и выполняется поиск оптимальных параметров конструкции и входной температуры жидкости. Учитывая вышесказанное, влияние спектрального состава солнечного излучения не должно оказывать существенного влияния на эффективность оптимизации.

Алгоритм оптимизации. Алгоритм реализован в программном комплексе Rhino/Grasshopper, имеющий набор инструментов для вычисления компонент солнечных векторов для выбранного места, даты и времени. Для оптимизации использовался в том числе генетический алгоритм.

Алгоритм вычислений.

Ввод исходных данных:

- географические координаты;
- календарная дата расчета;
- геоинформационные данные (окружающая застройка);
- параметры уравнения (7) и функционала (8).

Задание начального приближения и ограничений для толщины блоков фотобиореактора Δ , температуры втекающей жидкости T_{input} , формы ФАО Ω .

Параметрическое описание начальной формы архитектурной оболочки.

Дискретизация криволинейной поверхности архитектурной оболочки конечным количеством плоских полигонов.

Дискретизация по времени.

1). Начало итераций алгоритма оптимизации.

На каждой итерации, для каждого временного шага и полигона выполняется:

- а) вычисление солнечного вектора по географическим координатам, дате и времени;
- б) проецирование теней от окружающих зданий и расчет площади затенения полигона Δ_{Ω} ;
- в) вычисление с учетом затенения потока прямой солнечной радиации I' ;
- г) расчет температуры: решение обыкновенного дифференциального уравнения (7);
- д) расчет среднего прироста биомассы микроводорослей на полигоне и временном шаге.

2). Расчет целевого функционала F .

3). Использование генетического алгоритма для поиска следующего приближения параметров архитектурной оболочки, толщины блоков фотобиореактора и температуры поступающей жидкости.

4). Повторение шагов (а)–(д) и 2)–3).

МОДЕЛЬНАЯ ЗАДАЧА

Рассматривается день летнего солнцестояния и объект, географически расположенный на территории г. Ростова-на-Дону. Соотношение прямой и солнечной радиации $i = i' = 0,3I^{max}$. Размеры расчетной области – свободное пространство между зданиями городской застройки в которое вписывается ФАО – 140 × 140 м. Самое высокое близлежащее здание имеет высоту 164 м. Толщина блоков с микроводорослями может варьироваться от 0,1 до 0,2 м (выбор обусловлен допустимой несущей спо-

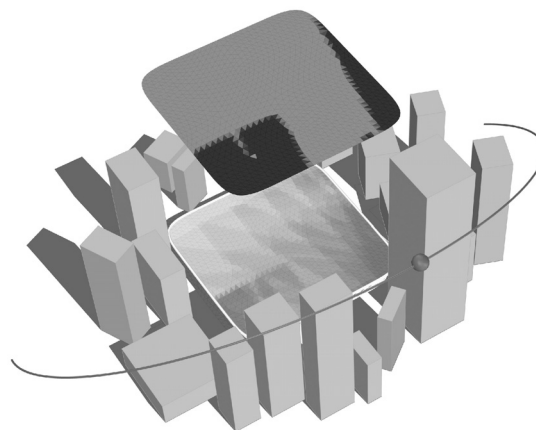


Рис. 3. Инсоляция и температура для плоской кровли с фотобиореакторами. Инсоляция изображена на верхней плоскости. Температура – на нижней плоскости.

собностью каркаса). Высота конструкции – от 6 до 50 м. Температура на входе от 10°C. Период времени для расчета функционала (8) – один световой день, за который объем жидкости в блоке фотобиореактора сменяется один раз.

В качестве образца конструкции мы рассматривали архитектурные проекты типа BIQ House [8], в которых фотобиореактор с микроводорослями является непосредственным элементом здания. Поэтому считаем, что температура снизу ФАО известна – это температура жилого здания, $T_{build} = 21^\circ\text{C}$. Температура окружающего воздуха $T_{air} = 32^\circ\text{C}$. Коэффициент теплопередачи соответствует свойствам наполненного воздухом строительного модуля из ЭТФЭ-мембраны, $\beta = 1,96 \text{ Вт/мК}$ (ЭТФЭ – сополимер этилена и тетрафторэтилена).

В работе мы используем параметры для хлореллы, а именно: $\mu = 1000 \text{ мг/г-сут}$, $K_I = 300 \text{ Вт/м}^2$, $c_T = 25^\circ\text{C}$; $\sigma_T = 5^\circ\text{C}$, $\alpha_1 = 70 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Начальные приближения: температура втекающей жидкости $T_{input} = 20^\circ\text{C}$, толщина единичного фотобиореактора $\delta = 0,1 \text{ м}$, форма оболочки – плоская кровля.

Для ФАО с такими параметрами, расположенной в условиях жаркого лета в Ростовской области, происходит фатальный перегрев водорослей. На рис. 3 приведены расчеты инсоляции и температуры для плоской формы сооружения в полдень.

На рис. 3 и на всех рисунках ниже используются следующие обозначения: для поверхностей, на которых изображена инсоляция, черный цвет соответствует инсоляции 300 Вт/м², светло-серый – 1000 Вт/м²; для температуры

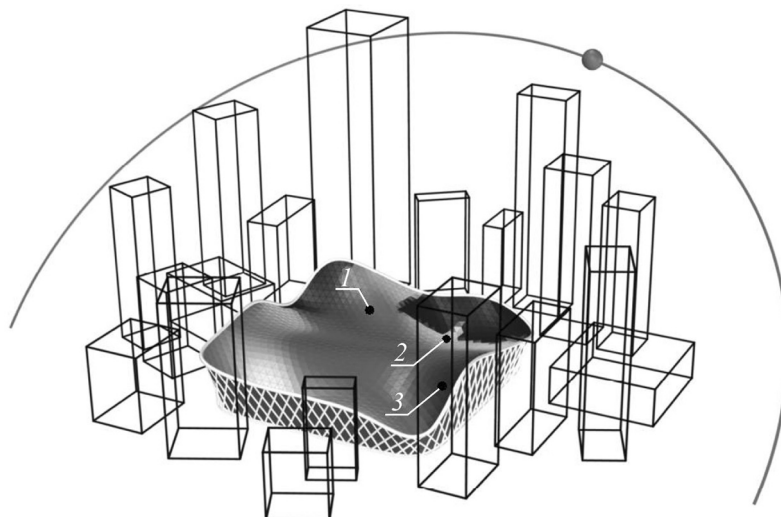


Рис. 4. Форма оптимизированной ФАО и расположение фотобиореакторов, для которых показана динамика изменения инсоляции и температуры на рис. 5.

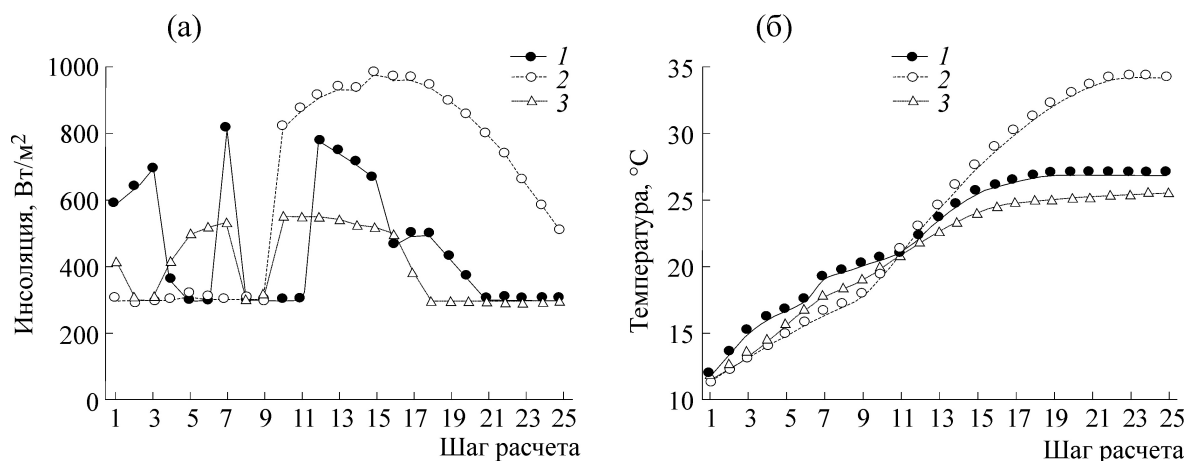


Рис. 5. Температура (а) и инсоляции (б) для фотобиореакторов, изображенных на рис. 4.

черный цвет соответствует 10°C , светло-серый – 45°C .

Расчеты показывают, что сочетание выбранных параметров приводит к тому, что к концу светового дня многие фотобиореакторы нагреваются до температуры выше 45°C . Кроме того, для плоской кровли, простое увеличение слоя воды в качестве очевидного решения несет конструктивные сложности, поскольку больший слой жидкости снижает скорость нагрева фотобиореакторов, но при этом пропорционально повышается вес конструкции. Это определяет необходимость изготовления купольной оболочки вместо плоской, с целью более равномерного распределения нагрузок.

В результате оптимизации с использованием вышеприведенного алгоритма найдены новые значения температуры поступающей жидкости

и толщины блока: $\Delta^* = 0,2 \text{ м}$, $T_{\text{input}}^* = 10^{\circ}\text{C}$. Существенно изменилась и форма несущего каркаса с микроводорослями. На рис. 4 приведена оптимизированная форма архитектурной оболочки. Номерами отмечены три отдельных фотобиореактора, для которых ниже на рис. 5 изображена динамика инсоляции и температуры в течение светового дня.

При оптимизации световой день разбивали на 25 шагов по времени и на этой временной сетке выполняли расчеты при разбиении на различное число полигонов. Для данных рисунков область содержит 2048 полигона, и при дальнейшем уплотнении пространственной сетки отличие в расчете функционала F не превосходят 1%.

Решались две задачи: одна – для фиксированных температуры на входе T_{input} и толщины

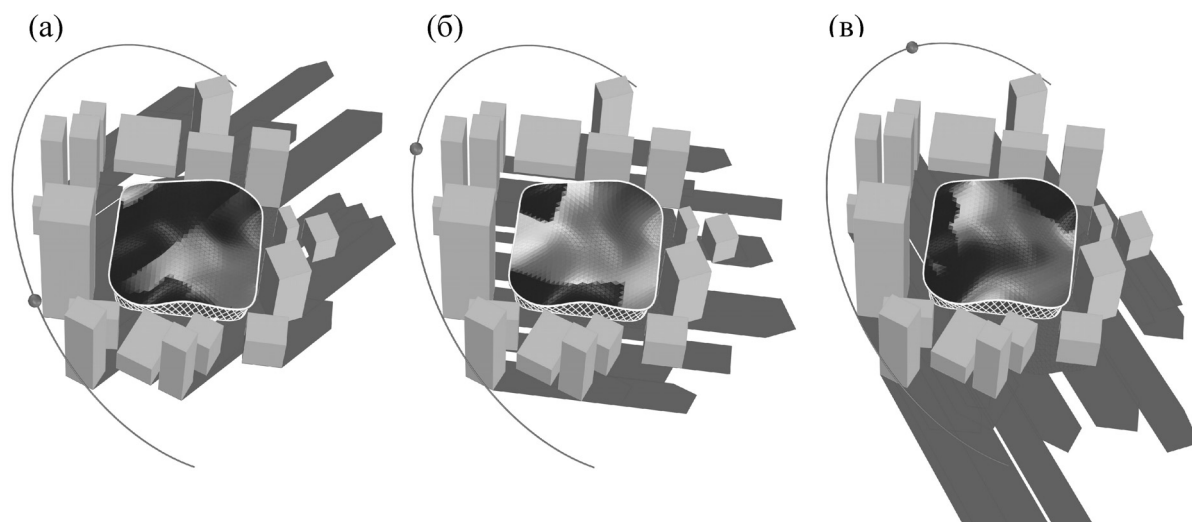


Рис. 6. Изменение инсоляции оптимизированной оболочки в течение светового дня: (а) – 8-й временной шаг, (б) – 13-й шаг, (в) – 19-й шаг.

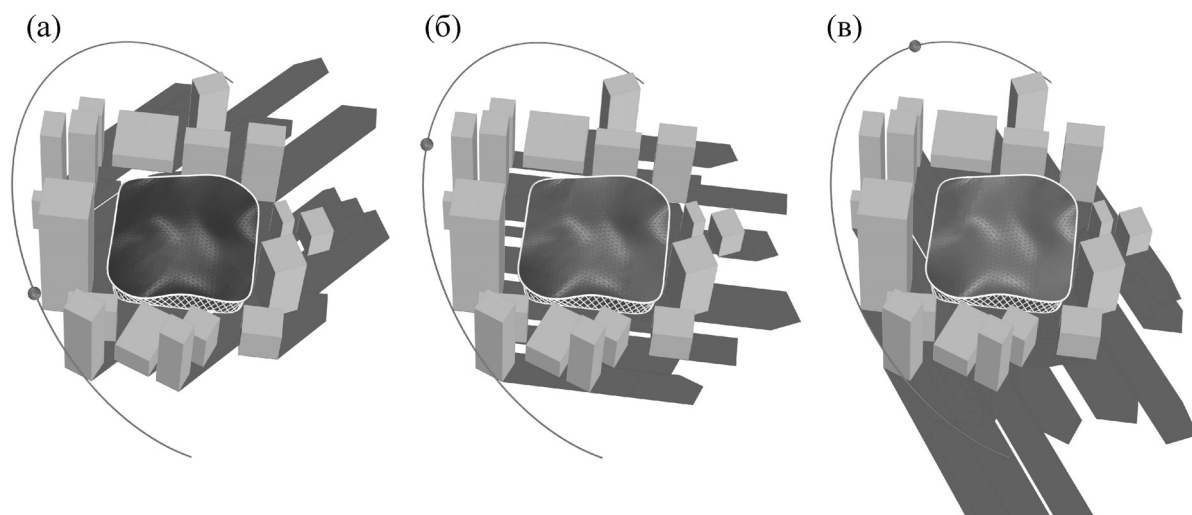


Рис. 7. Изменение температуры оптимизированной оболочки в течение светового дня: (а) – 8-й временной шаг, (б) – 13-й шаг, (в) – 19-й шаг.

блока Δ , и другая – в которой величины T_{input} и Δ являются оптимизируемыми параметрами наравне с формой архитектурной оболочки Ω . Как оказалось, только лишь варьирования формы недостаточно для обеспечения допустимых температур в условиях столь жаркого климата Ростовском области. Однако при изменениях всех параметров, в случае, когда T_{input} и Δ достигают значений 10°C и $0,2$ м соответственно, результаты оптимизации весьма положительны, поскольку прирост биомассы микроводорослей с единицы площади ФАО увеличивается с $10\text{--}14$ г/м² до $70\text{--}73$ г/м², и при этом площадь купольной конструкции возрастает

примерно на 20% по сравнению с плоской кровлей. Однако следует отметить, что данный расчет сделан по характерной максимальной инсоляции только одного дня в году, а окружающие условия меняются зачастую непредсказуемо, что определяет необходимость создания адаптивных фотобиологических архитектурных оболочек способных непрерывно реагировать на изменения освещенности, температуры, влажности, скорости ветра и т.д.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа посвящена вопросам генеративного проектирования распределенных в городской

среде фотобиологических очистных сооружений на базе светопроницаемых архитектурных оболочек с микроводорослями. Приведенная математическая модель инсоляции и теплового баланса фотобиореакторов предназначена для предсказания температурного режима среды с микроводорослями при их культивировании в реальных городских условиях с динамически меняющейся освещенностью. Модель может быть использована, например, для решения задачи из работы [3], для более точного прогноза развития биоценоза с учетом температуры и инсоляции в условиях естественного освещения. Также в работе сформулирован алгоритм максимизации функционала, описывающего на основе упрощенной зависимости удельный прирост биомассы микроводорослей на квадратный метр архитектурной оболочки. Показана возможность обеспечения оптимальной инсоляции и температурного режима за счет варьирования температуры поступающей жидкости, формы оболочки и толщины фотобиореакторов, на основе модельной задачи для наиболее солнечного дня в году.

Данная статья подготовлена по материалам V Съезда биофизиков России (Ростов-на-Дону, 2015).

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания на проведение НИОКР, шифр заявки № 2819.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. N. Buzalo, P. Ermachenko, T. Bock, et al., Proc. Engineering **85**, 84 (2014).
2. Р. Г. Геворгиз, М. Г. Шматок и А. С. Лелеков, Экология моря **70**, 31 (2005).
3. N. Buzalo, P. Ermachenko, A. Bulgakov, and T. Bock, in: Proc. 32nd Intern. Symp. on Automation and Robotics in Construction and Mining (Oulu, Finland, 2015), pp. 751–759.
4. D. Castro-Lacouturea, S. J. Quanb, and P. Pei-Ju Yangc, in: Proc. 31st Intern. Symp. on Automation and Robotics in Construction and Mining (Sydney, Australia, 2015), pp. 576–783.
5. Л. Т. Матвеев, Курс общей метеорологии. Физика атмосферы (Гидрометеиздат, Л., 1984).
6. П. В. Фурсова и А. П. Левич, Проблемы окружающей среды и природных ресурсов (Обзор. информ. ВИНТИ) **9**, 1 (2002).
7. J. C. Quinn, K. Catton, N. Wagner, and T. H. Bradley, Bioenerg. Res., **5**, 49 (2012).
8. The Building Exhibition /Smart Material Houses/ BIQ-2013. On-line: <http://www.iba-hamburg.de/en/themes-projects/the-building-exhibition-within-the-building-exhibition/smart-material-houses/biq/projekt/biq.html>.

Providing the Optimal Insolation of a Photobiological Architectural Shell for Microalgae Cultivation

P.A. Ermachenko*, N.S. Buzalo*, and D.S. Pervjazka**

*Platov South-Russian State Polytechnic University, ul. Prosveshchenia 132, Novocherkassk, 346428 Russia

**Department of Genetics, Microbiology and Biotechnology, Kuban State University, ul. Stavropolskaya 149, Krasnodar, 350040 Russia

Translucent architectural shells with microalgae are considered as an element of local photobiological treatment facilities integrated in the urban environment. A mathematical microalgae growth model for the prediction of insolation and temperature behaviour in the medium during microalgae cultivation under dynamically fluctuating natural lighting is presented. The task of optimizing the parameters of photobiological architectural shell with respect to temperature and insolation is set. The results of numerical experiments for the model problem are shown.

Key words: photobiological architectural shell, microalgae, insolation, mathematical modeling, generative design