

*д.т.н. Мочалин Е.В.,  
к.т.н. Мурга В.В.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

## **ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНОЙ РЕФРАКЦИИ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ**

*У роботі представлені результати моделювання рефракції атмосфери в приземному шарі і вплив цієї рефракції на точність спостереження штучних супутників Землі. Показано, що при розрахунку координат положення супутників необхідно враховувати стан тракту розповсюдження лазерного випромінювання.*

***Ключові слова:** атмосферна рефракція, лазерна локація, тракт розповсюдження променя, штучні супутники Землі.*

*В работе представлены результаты моделирования рефракции атмосферы в приземном слое и влияние этой рефракции на точность наблюдения искусственных спутников Земли. Показано, что при расчете координат положения спутников необходимо учитывать состояние тракта распространения лазерного излучения.*

***Ключевые слова:** атмосферная рефракция, лазерная локация, тракт распространения луча, искусственные спутники Земли.*

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** Среди атмосферных факторов, влияющих на точность лазерной локации, обычно выделяют [1]:

- ослабление оптического сигнала за счет поглощения и рассеяния;
- рефракцию вследствие температурной стратификации земной атмосферы, проявляющейся в наличии нескольких протяженных слоев с разными законами изменения температуры от высоты;
- турбулентное искажение лазерных пучков в атмосфере.

Основными факторами ослабления излучения являются селективное поглощение газовыми компонентами, дисперсное рассеяние различной природы и молекулярное рассеяние.

Преломление лучей при прохождении через различные слои земной атмосферы, которое еще называют земной рефракцией, в отличие от других факторов, легче поддается оценке и коррекции, поскольку

температурная и плотностная стратификация атмосферы достаточно стабильны.

**Анализ исследований и публикаций.** При исследовании атмосферной рефракции одним из решений может рассматриваться моделирование гидродинамических процессов воздуха вблизи земной поверхности, из которого можно получить распределение скорости, давления и температуры вдоль возможных траекторий лазерного луча.

Математическое моделирование гидродинамических процессов в вязких сплошных средах основано на уравнениях Навье – Стокса или полученных на их основе для расчета осредненных характеристик турбулентных течений уравнениях Рейнольдса. Эти уравнения дополняются уравнением непрерывности сплошной среды, а при расчете совокупных гидродинамических и тепловых задач – уравнением энергии. Вывод и характеристика этих уравнений содержатся в специальных курсах по гидроаэродинамике и теплообмену (например, [2, 3]). Большинство известных решений этих уравнений относятся к техническим системам, где области течения имеют относительно небольшие размеры, а некоторые характерные особенности позволяют внести различного рода упрощающие предположения. В нашем случае область течения достаточно велика, а необходимость учета различных особенностей рельефа местности не позволяет выделить общих и характерных черт для всех возможных ситуаций. Поэтому не представляется возможным использовать известные аналитические результаты для классических течений. С другой стороны, в типичных задачах атмосферной аэродинамики рассматриваются явления больших масштабов, чем те, на которых сказываются локальные особенности рельефа. Поэтому развитые в этой области подходы так же не могут быть применены в наших целях.

Наиболее гибким и универсальным средством теоретического анализа в гидродинамике в настоящее время является численное моделирование, которое позволяет, в частности, относительно легко на одной и той же методологической основе и в рамках одного модельного подхода рассматривать похожие гидродинамические процессы в областях разной конфигурации и с разными граничными условиями. В настоящее время в вычислительной гидродинамике наибольшее развитие получил метод конечных объемов, основы которого изложены в работе [4]. В монографии [5] приведено обоснование основных схемных решений и подходов к аппроксимации в рамках конечно-объемной технологии, которые отражают современные достижения в области вычислительной гидродинамики. Хотя в указанной работе в качестве прикладного аспекта рассматривается другой класс гидродинамических задач, все основные результаты, касающиеся реализации численного решения, вполне могут быть применены в интересах настоящего исследования.

**Постановка задачи.** Целью данной работы является оценка возможного влияния атмосферной рефракции на точность наблюдения искусственных спутников Земли. Учитывая, что получить точную оценку аналитическими методами затруднительно, в качестве инструмента принят метод численного моделирования параметров атмосферы и тракта распространения луча лазера.

**Изложение материала и его результаты.** При моделировании турбулентных движений жидкости особую роль играет выбор модели турбулентности, которым определяется состав дополнительных дифференциальных уравнений и замыкающих алгебраических соотношений. Это весьма обширный и специфический вопрос, который мы здесь рассматривать не будем. Заметим только, что компактный, но весьма содержательный обзор в этом направлении содержится в [6].

В качестве модельной задачи будем рассматривать течение воздуха в плоской области, представленной на рис. 1. Для характерных размеров примем следующие значения:  $H = 500$  м,  $L = 500$  м,  $h = 15$  м,  $h_0 = 10$  м,  $l_1 = 300$  м,  $l_2 = 300$  м.

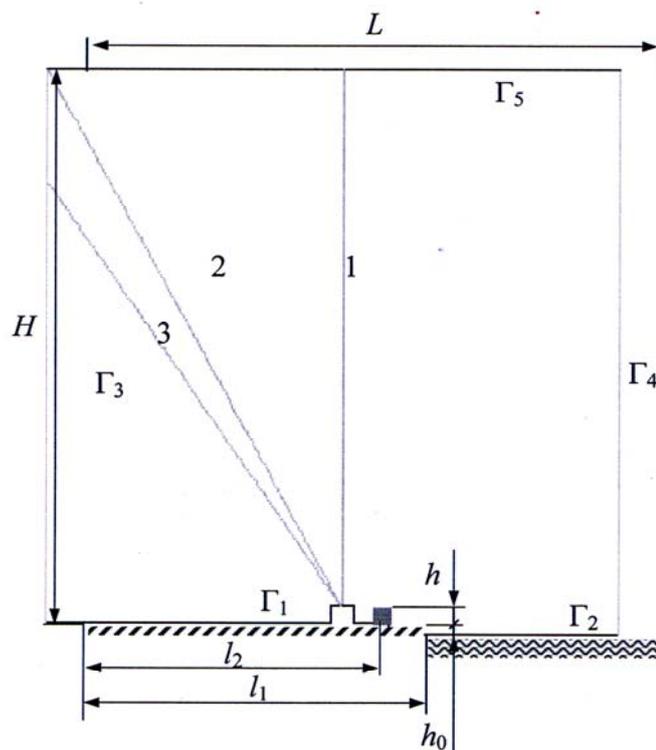


Рисунок 1 - Схема области течения

Цифрами 1,2,3 обозначены рассматриваемые в дальнейшем траектории лазерного луча, выходящего из верхней части здания станции, контуры которого представлены прямоугольником размерами  $20 \times 15$  м.

Рассматривается случай расположения станции вблизи возвышенного на 10 м берега достаточно большого водоема.

В данном случае весьма затруднительно выставить строго обоснованные граничные условия, особенно на границах, проходящих по воздуху. Поэтому будем стараться определить такие условия, которые, несмотря на некоторую искусственность, не искажают основных локальных особенностей течения и правильно отражают природу его возникновения. Одной из характерных причин возникновения движения воздушных масс в рассматриваемой ситуации является свободная конвекция, обусловленная разностью температур водной поверхности и поверхности земли. Это особенно выражено в теплое время года в дневные часы и в тех случаях, когда поверхность земли не укрыта достаточно густой растительностью, а имеет открытые участки земной, песчаной либо скалистой поверхности большой суммарной площади. Твердые поверхности под солнечными лучами быстро прогреваются до достаточно высоких температур, в то время, как водная поверхность имеет достаточно стабильную температуру, которая в силу большой теплоемкости воды изменяется значительно медленнее.

Рассмотрим ситуацию, когда поверхность земли и здания (граница  $\Gamma_1$ ) имеет температуру  $T_1 = 313$  К, а поверхность воды (граница  $\Gamma_2$ ) – температуру  $T_2 = 298$  К. Для скорости на этих границах примем обычное для вязкой среды условие «прилипания»  $V = 0$ . На верхней границе области ( $\Gamma_5$ ) будем считать постоянным статическое давление  $p = 95314$  Па. Для втекающих через эту границу внутрь расчетной области воздушных масс будем считать температуру равной  $T_5 = 293$  К. Для границ  $\Gamma_3, \Gamma_4$  примем условие равенства нулю нормальных производных от всех расчетных величин. С физической точки зрения это соответствует гладким (без трения) адиабатическим стенкам. Это условие является в достаточной степени искусственным, однако позволяет ограничить расчетную область, не внося существенных искажений в свободноконвективное течение на удалении от этих границ.

Что касается выбора модели турбулентности, то стандартная  $k - \varepsilon$  модель, обладающая хорошими вычислительными свойствами [6], в данном случае не менее оправдана, чем более современные и затратные модели.

На рисунке 2 представлены расчетные линии тока воздуха в рассматриваемой области. Над более нагретой твердой земной поверхностью возникают восходящие токи воздуха, а над более прохладной водной поверхностью имеют место нисходящие потоки. Их взаимодействие, как в рассматриваемом случае, может приводить к образованию локальных замкнутых рециркуляционных зон.

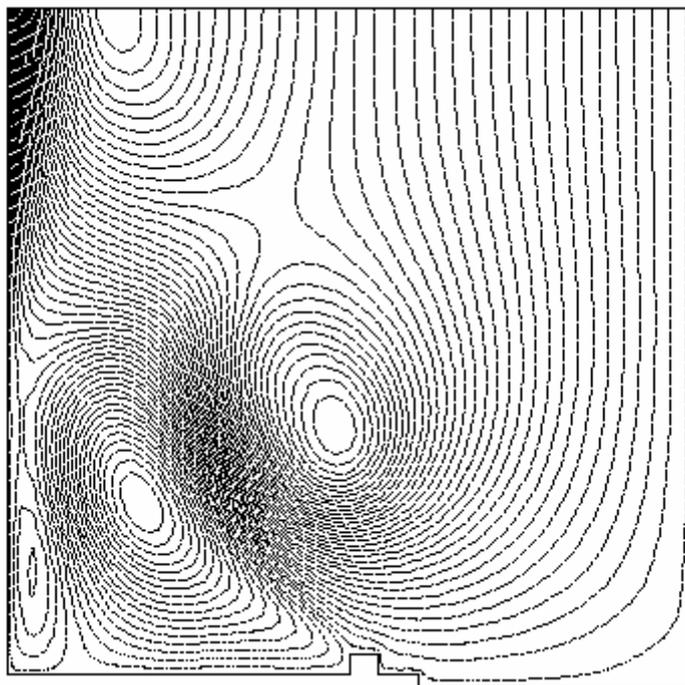


Рисунок 2 - Линии тока свободноконвективного движения воздуха

Характерной особенностью является натекание воздушных масс на берег со стороны воды. Наличие возвышенного берега и стен здания в такой ситуации приводят к отрыву набегающего потока от земной поверхности и образованию зон смешения слоев воздуха в приземной области над зданием. Если рассматривается здание лазерной локационной станции, то эти зоны смешения находятся в области распространения луча.

Резкое изменение температуры воздуха происходит в тонком слое вблизи нагретой поверхности. В большей части остальной области температура лишь на несколько десятых градуса выше значения  $T_s = 293$  К. Однако отмеченная выше особенность, связанная с образованием отрывного следа проявляется еще и в появлении температурного шлейфа в зоне смешения потоков (рисунок 3). Хотя изменение температуры в области шлейфа лишь немного больше одного градуса, однако, этого обстоятельства, как будет показано далее, в совокупности с другими факторами будет достаточно, чтобы в определенной степени сказаться на рефракции лазерного луча.

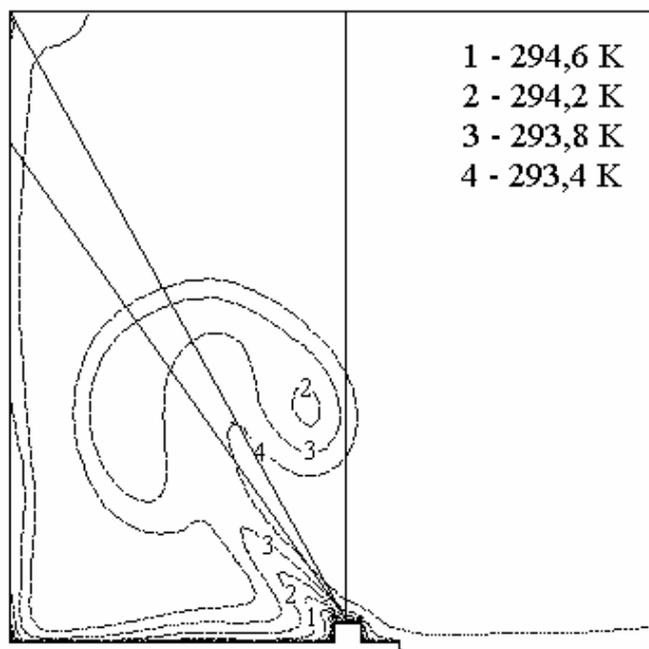


Рисунок 3 - Контурный график распределения температуры

**Выводы.** На основании полученных данных можно сделать вывод о необходимости учета атмосферной рефракции при расчете угловых координат спутников. Одним из решений проблемы является ввод данных метеонаблюдений в начале каждого сеанса локации как предположения с последующей оперативной коррекцией метеоданных.

#### Библиографический список

1. *Основы импульсной лазерной локации: учеб. пособие для вузов / В.И. Козинцев, М.Л. Белов, В.М. Орлов и др.; [под ред. В.Н. Рождественина]. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 512 с.*

2. *Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1987. – 840 с.*

3. *Ландау Л.Д. Теоретическая физика: в 10-ти т. / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1986. – Т.6: Гидродинамика. – 736 с.*

4. *Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.*

5. *Мочалин Е.В. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил / Е.В. Мочалин, А.А. Халатов. – Киев: Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 2010. – Т.8: Гидродинамика закрученного потока в ротационных фильтрах. – 428 с.*

6. *Белов И.А. Модели турбулентности: [учебное пособие] / И.А. Белов. – Л.: ЛМИ, 1986. – 100 с.*

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. Заблодским Н.Н.*