

Моделирование воздушного потока обогревателя-дестратификатора в помещении большого объема

Н.С. Буйнов*, Д.О. Ивановский*, В.Н. Щепетков**

**Учреждение образования «Витебский государственный университет им. П.М. Машерова»*

***Открытое акционерное общество «Витебский завод радиодеталей “Монолит”»*

В данной статье рассмотрены процесс и методы моделирования теплового и воздушного потоков обогревателя-дестратификатора в помещении большого объема, а также проведение оптимизации параметров с целью увеличения производительности прибора и уменьшения потерь кинетической энергии потока на диссипацию в проточной части прибора, а также уменьшения шума путем выявления образования отрывных течений.

На основе двух основных и взаимодополняющих методов моделирования воздушного потока: конечно-элементного анализа и склейки течений и суммирования элементарных струй – была рассчитана конструкция диффузора для обогревателя-дестратификатора и проведен численный эксперимент моделирования воздушного потока, сформированного рассчитанной конструкцией диффузора, для задач в стационарной и нестационарной постановках.

Ключевые слова: моделирование, турбулентность, воздушный поток, тепловой поток, воздушно-нагревательный агрегат, обогреватель-дестратификатор, диффузор, метод конечных элементов.

Modelling of air flow of heater-destratifikator in room of large volume

N.S. Buinov*, D.O. Ivanovsky*, V.N. Schepetkov**

**Educational establishment «Vitebsk State University named after P.M. Masharov»*

*** Vitebsk Radio Components Monolith Plant*

This article considers the process and methods of modeling thermal and air flow of heater-destratifikator in rooms of large volume, as well as methods of optimization to increase the productivity of the device and reduce the loss of kinetic energy flux on dissipation in the flow part of the device, as well as reduction of noise by identifying the formation of separated flows.

On the basis of two methods of modeling the air flow: the method of finite element analysis and the method of splicing currents and summation of elementary streams we have calculated the design of the diffuser of heater-destratifikator and have made numerical simulations of air flow for steady-state and transient tasks.

Keywords: modeling, turbulence, air flow, heat flow, air-heating unit, heater-destratifikator, diffuser, finite element method.

Методы компьютерного моделирования позволяют сократить сроки расчета, проектирования и оптимизации приборов и устройств при минимальных материальных затратах и позволяют рассчитать и опробовать различные рабочие параметры приборов, скорректировать их и провести численный эксперимент еще до воплощения в материале. В частности, в данной статье рассмотрен процесс моделирования теплового и воздушного потоков обогревателя-дестратификатора в помещении большого объема, а также проведение оптимизации его параметров. Целью исследования является увеличение производительности прибора и уменьшение потерь кинетической энергии потока на диссипацию в проточной части прибора, а также уменьшения шума путем выявления образования отрывных течений.

Материал и методы. Обогреватель-дестратификатор предназначен для обогрева

больших и высоких помещений. Основная его идея – использование тепла, заключенного в верхних слоях воздушной среды помещения, за счет возврата поднимающегося теплого воздуха вниз. Поток поднимающегося теплого воздуха направляется вниз в зону обогрева, в результате чего происходит экономия электроэнергии, затрачиваемой на нагрев воздуха, и уменьшаются потери тепла через перекрытия помещения.

Основными конструктивными элементами обогревателя, влияющими на ток воздуха, являются

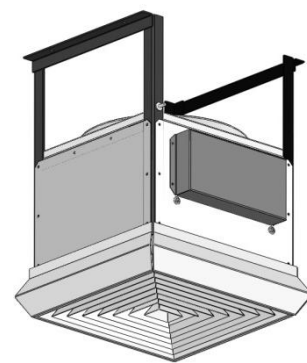


Рис. 1. Внешний вид обогревателя-дестратификатора.

ся: вентилятор, диффузор, панель нагревательных регистров, а также сама конфигурация корпуса. Для решения задачи моделирования воздушного потока в помещении большого объема используется два основных метода: конечных элементов и склейки течений и суммирования элементарных струй.

Результаты и их обсуждение. Для предварительной оценки параметров потока воспользуемся методом склейки течений и суммирования элементарных струй [1]. Прибор должен обладать высокой дальностью выпускаемого воздушного потока. На основании метода склейки течений поток, исходящий из обогревателя, можно представить как воздушный фонтан, бьющий вертикально вниз. Основным параметр воздушного фонтана – это дальность:

$$(Z_B)_{\max} = 2/3 H \sin \beta, \quad (1)$$

где H – геометрическая характеристика фонтана, $\sin \beta$ – угол падения потока относительно горизонта.

Но в нашем случае требуется также найти оптимальное соотношение между дальностью и площадью потока у поверхности пола, так как для эффективного обогрева поток, формируемый обогревателем, должен охватывать максимальную площадь.

Предварительные расчеты показали, что максимальная дальность достигается при отклонении потока от вертикали на угол до 35 градусов. Расчет прибора производился для помещений до 12 метров.

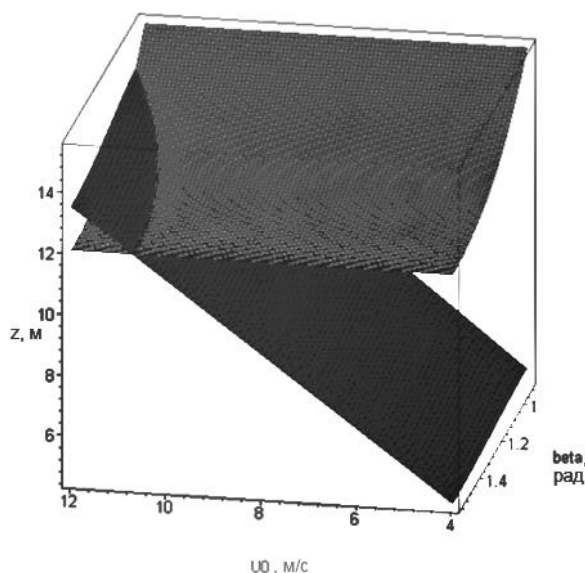


Рис. 2. Графики поверхностей, задаваемых радиус-вектором дальности и радиус-вектором поверхности пола.

На графиках (рис. 2) представлены поверхность радиус-вектора дальности потока

(нижний график) и поверхность радиус-вектора пола (верхний график). Линия пересечения этих двух графиков является оптимальным режимом работы обогревателя-дестратификатора. То есть это тот случай, когда при достижении потоком поверхности пола поток имеет скорость, равную нулю.

Конфигурация формируемого потока регулируется диффузором. Была выбрана конструкция статического веерного диффузора, он не имеет движущихся механических частей и формирует не изменяющийся, постоянный во времени воздушный поток. Площадь диффузора разделена на 4 одинаковых сектора, находящихся друг относительно друга под углом 90 градусов. Каждый сектор состоит из набора пластин, изменяющих свое положение относительно вертикали. Такая конструкция позволяет изменять дальность диффузора и площадь обдуваемой поверхности, в зависимости от высоты помещения, путем изменения угла наклона пластин секторов диффузора.

При прохождении воздушного потока через диффузор происходит изменение траектории движения воздуха, за счет чего происходит образование отрывных течений, срывов и вихрей на пластинах.

Стабилизация течения при возникновении турбулентности на входной кромке трубы либо щели наступает на расстоянии:

$$x_0 \geq 0,6 D_0 Re, \quad (2)$$

где D_0 – диаметр трубы либо эффективная ширина щели, Re – число Рейнольдса для потока на данном участке [2].

При прохождении воздушного потока через диффузор, при отсутствии плавного входа потока, происходит резкое изменение равномерности течения потока и его внутренней структуры путем образования зон с высокой турбулентностью, в виде вихрей и отрывных течений.

На образование отрывных течений, срывов воздушного потока и вихрей, значительно снижающих эффективность диффузора, влияют такие факторы, как форма пластин, угол их наклона относительно направления движения потока, а также наличие на поверхности пластин различных неровностей и шероховатостей.

Исходя из предварительной оценки, при начальной скорости потока 12 м/с максимальное отклонение потока от вертикали, при котором его центр достигает пола, составляет 30–33 градусов. Для эффективного обогрева максимальной возможной площади, уменьшения образования отрывных течений и крупных вихрей, при прохождении потока через диффузор, нужно найти

профиль пластин диффузора, эффективно работающих на углах атаки от 0 до 30 градусов. Требуется найти такую форму пластин для диффузора, чтобы при их использовании наблюдались отсутствие либо минимизация отрывных течений и срывов на пластинах диффузора при углах атаки до 30 градусов, форма пластин должна быть простой для практической реализации в материале. Расстояние между пластинами рассмотрим для двух случаев, когда оно равно 1 см и 3 см. Ширину пластины, на основании вышеизложенных вычислений, возьмем равной 5 см.

Для плавного входа потока в диффузор сделаем переднюю кромку пластины скругленной, а саму форму обтекаемой – сигарообразной. Максимальные срывы должны наблюдаться при максимальном угле атаки 30 градусов. Таким образом, рассмотрим только этот предельный случай.

Моделирование производится в программном комплексе ANSYS методом конечных элементов [4–5]. Общий вид геометрической модели и расчетной области приведен на рис. 3.

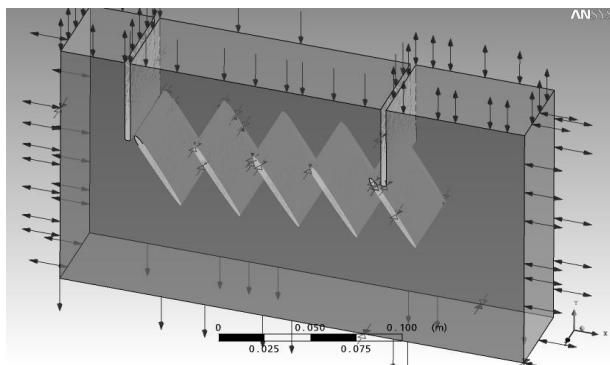


Рис. 3. Геометрическая модель расчетной области пластин диффузора и заданные на ней граничные условия.

Сеточная модель, построенная для проведения расчетов, состоит из 100 тыс. элементов (тетраэдров). В областях резкого изменения кривизны поверхности, в окрестности изломов, которые могут спровоцировать отрыв пограничного слоя, и в пограничном слое, вблизи твердых стенок, делалось специальное сгущение ячеек сетки. На этой сетке численно решена система уравнений динамики сжимаемого, вязкого, неизотермического газа с учетом турбулентности. Задача решалась в стационарной постановке. Свойства газа соответствуют параметрам воздуха при нормальном давлении и температуре 25°C. При решении уравнений применялась k-ε модель турбулентности.

Поток входит в центральной части параллелепипеда (рис. 3). Так как поток прошел сквозь

нагревательные элементы обогревателя-дестратификатора, то примем, что скорость потока 12 м/с, температура 40°C, режим течения – дозвуковой, интенсивность турбулентности 5%. Нижнее основание параллелепипеда – это выход потока с граничным условием типа «Outlet». «Передняя» и «задняя» часть параллелепипеда имеют граничные условия типа «Symmetry».

Боковые стенки параллелепипеда, а также края верхнего основания являются участком свободного течения, где задано постоянное давление, равное атмосферному, и температура окружающего воздуха равна 20°C. Отклоняющие пластины диффузора в модели представлены в виде гладкой адиабатической стенки, без скольжения.

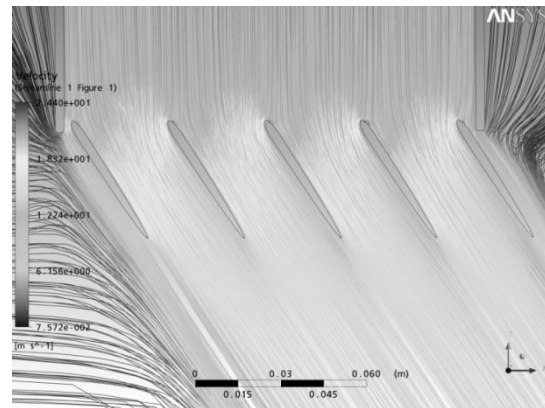


Рис. 4. Величина модуля скорости вдоль линии тока при расстоянии между пластинами 3 см.

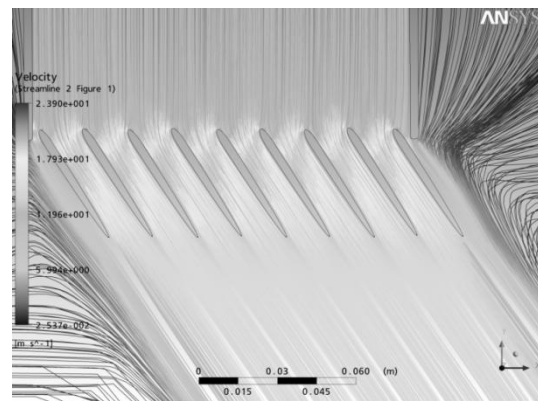


Рис. 5. Величина модуля скорости вдоль линии тока при расстоянии между пластинами 1 см.

На рис. 4–5 представлены результаты расчетов модуля скорости вдоль линии тока для рассмотренных нами случаев, когда расстояние между пластинами диффузора составляет 3 и 1 см соответственно. Крупных срывов и обра-

зования вихрей в процессе прохождения потока между пластинами диффузора не наблюдается ни в первом, ни во втором случае. Выбранная нами форма пластин обеспечивает плавное вхождение потока в диффузор и предотвращает образование срывов потока, что и требовалось найти в результате численного эксперимента.

Для плавного огибания потоком пластин диффузора можно создать пограничный турбулентный слой путем установки небольшого препятствия или группы препятствий на закругленной передней кромке пластины. За счет появления в этом случае пограничного слоя отрыв от поверхности пластины происходит значительно ниже по потоку. Лобовое сопротивление пластины при этом тоже значительно уменьшается. Для описания этого эффекта используются данные классического эксперимента Прандтля–Визельсбергера [3].

После построения реальной геометрической модели диффузора и части помещения большого объема высотой 12 метров оказалось, что данная задача имеет размерность порядка 15–18 миллионов конечных элементов и на оборудовании и программном обеспечении, имеющемся в наличии, рассчитана быть не может. Поэтому после анализа исходных данных задачи были внесены следующие упрощения в модель диффузора и части помещения.

Модель части помещения большого объема представляет собой усеченный конус высотой 12000 мм с нижним основанием радиуса 9000 мм и верхним основанием радиуса 5000 мм. Диффузор представлен в виде эффективных сечений пространства между пластинами диффузора, перпендикулярного исходящему потоку, они являются поверхностями с граничным условием «Inlet» и скоростью истекающего потока, равной 12 м/с.

В результате этих симплификаций удалось уменьшить размерность задачи до 784 тыс. конечных элементов (тетраэдров). В окрестностях диффузора было сделано сгущение сетки. На этой сетке численно решалась задача динамики сжимаемого, вязкого, неизоэнтальпического газа.

Рассматривалась задача двух видов: в стационарной и нестационарной постановке. При решении использовалась модель турбулентности k-ε. Свойства применяемой модели газа соответствуют параметрам воздуха при нормальном давлении и температуре 25°C. Граничные условия следующие: скорость потока, истекающего из диффузора, 12 м/с, его температура 35°C интенсивность турбулентности 5%. Температура окружающего воздуха в помещении

15°C, давление 1 атм. Граничные условия для пола (нижнего основания конуса) и для стенок диффузора применены в виде гладкой адиабатической перегородки.

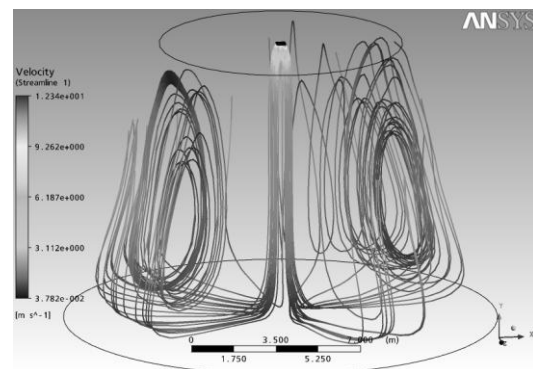


Рис. 6. Линии тока с распределением модуля скорости по их длине в модели помещения большого объема.

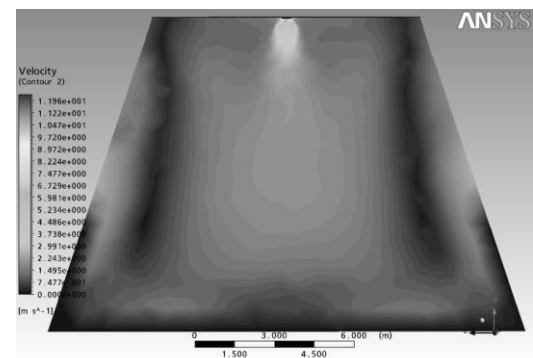


Рис. 7. Поля скоростей в продольном сечении помещения большого объема.

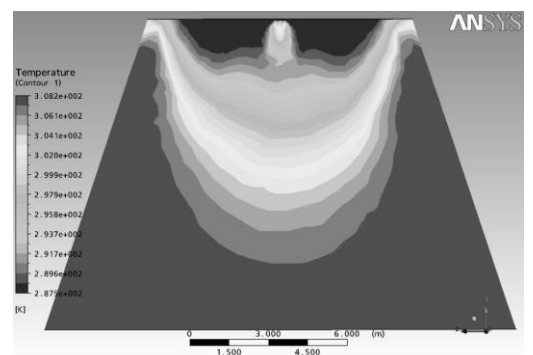


Рис. 8. Поля температур в продольном сечении помещения большого объема.

В результате решения задачи получили: линии тока, исходящие из диффузора (рис. 6), характеризуют движение и направление потока, поэтому мы можем видеть, что сформированный поток полностью удовлетворяет условию задачи. Поток достигает поверхности пола и обдувает значительную площадь его поверхности. На рис. 7 мы можем видеть распределение полей скоростей в поперечном сечении поме-

щения. В полутораметровом слое, на уровне пола, скорость движения потока не превышает 0,7–1 м/с, что удовлетворяет санитарным нормам. В центральной части помещения мы видим зону интенсивного перемешивания воздушных масс, это способствует нагреву большого объема воздуха и переносу тепла в нижние слои помещения. При рассмотрении распределения полей температур в продольном разрезе по всему объему помещения (рис. 8) можно видеть, что нагретый воздух не скапливается в верхних слоях помещения, а эффективно перемещается вниз обогревателем-дестратификатором.

Так как стационарное решение применимо только для установившегося стационарного течения в помещении, а в реальных условиях это может произойти только в случае бесконечно долгой работы обогревателя и отсутствия внешних воздействий, то рассмотрим работу обогревателя в пределах более короткого отрезка времени. Рассмотрим задачу моделирования воздушного потока в помещении большого объема в нестационарной постановке: скорость движения воздуха в помещении в начальный момент времени 0 м/с, давление воздуха 1 атм., температура 15°C, интенсивность турбулентности 1%, скорость и температура истекающего потока и остальные граничные условия применены такие же, как и в стационарной задаче. Длительность исследования потока 300 с, шаг 6 с, время в начальный момент 0 с.

В результате получили, что в течение первых 30 секунд поток развивается, так же, как и рассчитывалось в стационарной задаче, но дальнотойность оказалась меньше на 2 метра. За это время в зоне развития струи воздух прогревается и начинает подниматься вверх, и за счет прогретого и поднимающегося воздуха с 36 секунды по 60-ю происходит значительное сокращение струи до 4–5 метров. После сильного нагрева воздуха в зоне развития потока, с 66 секунды траектория потока слегка изменяется, он отклоняется в сторону, после этого дальнотойность струи снова постепенно увеличивается до 8–9 метров, а затем уменьшается. Таким образом,

мы наблюдаем процесс колебаний дальнотойности струи, эти пульсации затухающие, их период приблизительно равен $T \approx 90\text{--}100$ с. Данное явление образуется за счет того, что воздух, находящийся вблизи потока, но не захваченный им, со временем сильно прогревается из-за плохой теплопроводности и плохого перемешивания воздушных масс, поэтому происходит эффект «поджатия» струи.

Заключение. В данной статье рассмотрен выделенный объем гипотетического пустого помещения, в котором мы смоделировали работу обогревателя-дестратификатора, в реальных же условиях на распространение потока в помещении влияет огромное количество факторов. Например, такие факторы, как вертикальный градиент температур в помещении, различные стесняющие условия для потока (наличие стен, перегородок, предметов), наличие сторонних струйных и конвективных потоков, образованных работающим оборудованием, отопительными приборами, вентиляционными системами, теплопроводность стен, потолков, наличие окон и солнечного излучения в помещении и большое количество прочих факторов. Поэтому для точного моделирования поведения потока в помещении, сформированного обогревателем-дестратификатором, требуется точное построение модели помещения и модели самого прибора, а также более полное задание граничных условий. Но в этом случае задача становится очень громоздкой, и расчет подобных моделей требует наличия очень больших вычислительных ресурсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шепелев, И.А. Аэродинамика воздушных потоков в помещении / И.А. Шепелев. – М.: Стройиздат, 1978. – С. 145.
2. Кутателадзе, С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: справочное пособие / С.С. Кутателадзе. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – С. 367.
3. Ван-Дайк, М. Альбом течений жидкости и газа / М. Ван-Дайк. – М.: Мир, 1986. – С. 184.
4. ANSYS, Inc. Theory manual / ed. by P. Kohnke. – Canonsburg: SAS IP, Inc., 2001. – P. 1260.
5. Madenci, E. The finite element method and applications in engineering using ANSYS / E. Madenci, I. Guven. – Springer Science, 2006. – P. 686.

Поступила в редакцию 31.08.2010

Адрес для корреспонденции: e-mail: d.ivanovsky@gmail.com – Д.О. Ивановский