

**LS-DYNA**  
**KEYWORD USER'S MANUAL**  
**VOLUME I**

**March 2001**  
**Version 960**

Copyright © 1992-2001  
**LIVERMORE SOFTWARE**  
**TECHNOLOGY CORPORATION**  
All Rights Reserved

---

**LS-DYNA**  
**Руководство пользователя**  
**Часть 1**

Mailing Address:

Livermore Software Technology Corporation  
2876 Waverley Way  
Livermore, California 94550-1740

Support Address:

Livermore Software Technology Corporation  
7374 Las Positas Road  
Livermore, California 94550

TEL: 925-449-2500

FAX: 925-449-2507

EMAIL: sales@lstc.com

Copyright © 1992-2001 by Livermore Software Technology Corporation  
All Rights Reserved

---

Перевод выполнен под редакцией к.т.н. Бориса Гавриловича Рубцова

Перевод текста:

Н. И. Антонова, И. Л. Зырянова, В. Б. Литвинов, Б. Г. Рубцов, Л. С. Талантова

Компьютерное оформление:

А. Б. Байкалова

Дистрибьютор по России и странам СНГ - открытый вычислительный центр «СТРЕЛА»

456770, г. Снежинск Челябинской области, ул. Васильева, 13

e-mail: lsdyna@strela.snz.ru

тел.: (351-72) 5-24-12, (351-72) 5-21-11

факс: (351-72) 5-25-52

# РУКОВОДСТВО ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ ПРОГРАММЫ LS-DYNA

## ВВЕДЕНИЕ

### ХРОНОЛОГИЧЕСКАЯ СПРАВКА

Программа DYNA3D была создана в Ливерморской национальной лаборатории имени Лоуренса [1]. Самые первые ее приложения преимущественно относились к анализу напряженного состояния конструкций, подвергаемых разного рода ударным нагрузкам. Эти приложения требовали значительных для того времени компьютерных ресурсов, поэтому сразу же стала очевидной потребность в существенно более производительной версии программы. Одна из причин низкого быстродействия была обусловлена неэффективной реализацией конечно-элементной технологии и тем фактом, что суперкомпьютеры в 1976 году были значительно медленнее, чем современные персональные компьютеры. Кроме того, простой способ моделирования скользящих при контактном взаимодействии поверхностей оказался непротиворечивым только в случае регулярных поверхностей раздела, которые нетипичны для большей части конечно-элементных отображений объектов сложной трехмерной геометрии; в результате часто было очень трудно получить нужную сетку для моделирования контакта. Первая версия включала стержневые, мембранные элементы и набор объемных элементов. Перечень объемных элементов начинался 8-узловым элементом с одной точкой интегрирования и контролем искажений формы элемента по типу песочных часов и заканчивался 20-узловым элементом с восемью точками интегрирования. Из-за высоких издержек использования 20-узлового элемента, наличия режимов нулевой энергии, связанных с редуцированным 8-точечным интегрированием, и высоких частот колебаний объема элемента, уменьшающих шаг решения по времени, в поздних версиях программы DYNA3D отказались от элементов высокого порядка. Одновременно разрабатывалась двумерная версия программы - DYNA2D.

Новая версия программы DYNA3D появилась в 1979 году и обеспечивала почти оптимальное быстродействие на базе суперкомпьютера CRAY-1, включала улучшенный вариант контактного взаимодействия поверхностей раздела, который допускал наличие сегментов из элементов треугольной формы и работал на порядок быстрее, чем предшествующий обработчик контактов. Из версии 1979 года были исключены строительные стержневые элементы и объемные элементы высокого порядка, а также некоторые модели материалов первой версии. В новой версии была представлена реализация элементов с опцией интегро-дифференциального метода, разработанного Уилкинсом и др. [2].

Версия 1981 года [3] представляет собой развитие версии 1979 года. Для расширения круга решаемых задач, включающих взаимодействие конструкций с грунтом и взрывной волной, были добавлены девять моделей материалов. Для случая действия угловых скоростей и ускорений системы отсчета, с которой связана расчетная модель, были введены инерционные нагрузки. Также была разработана процедура обмена данными с трехмерным эйлеровским кодом JOY [4] для изучения отклика конструкций на действие импульса пробивающего тела. Была предусмотрена опция для накопления в дисковой памяти данных, относящихся к элементу, что удвоило возможности программы DYNA3D.

Следующая версия программы DYNA3D [5] унаследовала непосредственный ввод характеристик материала, реализованный в программе DYNA2D [6]. Эта новая возможность позволяла легко добавлять уравнения состояния и определяющие соотношения любой

# **\*AIRBAG**

Назначение: описание подушки безопасности или контрольного объема.

Ключевое слово **\*AIRBAG** (подушка безопасности) используется для описания термодинамических свойств газа, поступающего в подушку безопасности, а также для описания конфигурации полностью наполненной подушки. Управляющие карты ключевого слова в этом разделе вводятся в алфавитном порядке:

**\*AIRBAG\_OPTION1\_{OPTION2}\_{OPTION3}\_<OPTIONAL NUMERIC ID>**  
**\*AIRBAG\_INTERACTION** (ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДВУХ ПОДУШЕК)  
**\*AIRBAG\_REFERENCE\_GEOMETRY\_OPTION\_OPTION** (БАЗОВАЯ ГЕОМЕТРИЯ ПОДУШКИ)

**\*AIRBAG\_OPTION1\_{OPTION2}**

Опция *OPTION1* задает одно из следующих термодинамических соотношений:

**SIMPLE\_PRESSURE\_VOLUME** (Простое соотношение давление-объем)  
**SIMPLE\_AIRBAG\_MODEL** (Элементарная модель подушки безопасности)  
**ADIABATIC\_GAS\_MODEL** (Адиабатическая газовая модель)  
**WANG\_NEFSKE** (Модель Ванга-Нефске)  
**WANG\_NEFSKE\_JETTING** (Модель Ванга-Нефске с впрыскиванием струи)  
**WANG\_NEFSKE\_MULTIPLE\_JETTING** (Многоструйная модель Ванга-Нефске)  
**LOAD\_CURVE** (Задающая кривая)  
**LINEAR\_FLUID** (Линейная модель жидкости)  
**HYBRID** (Гибридная модель)  
**HYBRID\_JETTING** (Гибридная модель с впрыскиванием струи)  
**HYBRID\_CHEMKIN** (Гибридная модель Чемкина)

Опция *OPTION2* указывает на считывание дополнительной строки данных для термодинамических соотношений типа Ванга-Нефске. Эти дополнительные данные определяют условия инициирования выходного потока из подушки безопасности. *OPTION2* задается единственным образом:

**POP**

Опция *OPTION3* указывает на использование постоянства импульса при расчете воздействия струи на подушку безопасности. Считывается дополнительная строка данных. *OPTION3* задается только единственным образом:

**CM**

Идентификатор **OPTIONAL\_NUMERIC\_ID** – это уникальный номер, который используется только для идентификации подушки безопасности, заданной при описании взаимодействия подушки безопасности с использованием управляющей карты **\*AIRBAG\_INTERACTION**. Ни для чего другого этот номер не используется. Чтобы задать идентификатор ID, равный 25, для подушки безопасности, поведение которой подчиняется термодинамическому соотношению Ванга-Нефске, нужно ввести следующее ключевое слово: **\*AIRBAG\_WANG\_NEFSKE\_25**. Более подробную информацию об этих моделях можно найти в работах Ванга [47, 48] и Нушольца [12, 49].

**Формат карты**

|            | 1   | 2      | 3         | 4    | 5    | 6    | 7   | 8    |
|------------|-----|--------|-----------|------|------|------|-----|------|
| Переменная | SID | SIDTYP | RBID      | VSCA | PSCA | VINI | MWD | SPSF |
| Тип        | I   | I      | I         | F    | F    | F    | F   | F    |
| Умолчение  | нет | 0      | 0         | 1.   | 1.   | 0.   | 0.  | 0.   |
| Примечания |     |        | необязат. |      |      |      |     |      |

**ПЕРЕМЕННАЯ****ОПИСАНИЕ**

|        |   |
|--------|---|
| SID    | Идентификатор набора  |
| SIDTYP | Тип набора:<br>= 0: сегмент,<br>≠ 0: идентификаторы частей расчетной модели.  |
| RBID   | Идентификатор части абсолютного твердого тела для написанной пользователем подпрограммы активации:<br>= - <i>RBID</i> : флаги подпрограммы датчика инициируют нагнетатель; задающие кривые сдвигаются на время инициирования.<br>= 0: контрольный объем активизирован с момента времени 0<br>= <i>RBID</i> : пользовательская подпрограмма датчика отмечает начало наполнения подушки; задающие кривые сдвигаются на время инициирования. См. Приложение В. |
| VSCA   | Коэффициент пересчета объема $V_{sca}$ (по умолчанию = 1.0)   |
| PSCA   | Коэффициент пересчета давления $P_{sca}$ (по умолчанию = 1.0)   |
| VINI   | Начальный заполненный объем $V_{ini}$   |
| MWD    | Усредненный по массе коэффициент демпфирования $D$  |
| SPSF   | Коэффициент пересчета давления в заторможенном потоке, $0 \leq \gamma \leq 1$   |

**Примечания:**

Первая карта необходима для всех опций подушки безопасности. Порядок следующих карт, различный для каждой из опций, приведен на следующих страницах.

Контрольные объемы с сосредоточенными параметрами – это способ определения объемов внутри замкнутых поверхностей и приложения давления, основанный на некоторых термодинамических соотношениях. Объем задается набором многоугольников, как при задании граничных условий для давления, или заданием подмножества материалов оболочечных элементов, образующих замкнутую границу. Все нормали многоугольника должны быть ориентированы наружу по отношению к контрольному объему. Образовавшиеся “дыры” считаются закрытыми плоскими поверхностями.

Коэффициенты  $V_{sca}$  и  $P_{sca}$  используются для пересчета величин применяемой системы единиц при переходе от конструкции нагнетателя к его конечно-элементной модели. Для каждого контрольного объема используется два набора значений объема и давления. Первый набор появляется как результат использования конечно-элементной модели для расчета объема ( $V_{femodel}$ ) и прикладываемого давления ( $P_{femodel}$ ). Термодинамические параметры контрольного объема могут быть рассчитаны в некоторой другой системе единиц; так, существуют независимые объем ( $V_{cvolume}$ ) и давление ( $P_{cvolume}$ ), которые используются при интегрировании дифференциальных уравнений для контрольного объема. Формулы перехода имеют вид:

$$V_{cvolume} = (V_{sca} V_{femodel}) - V_{ini},$$

$$P_{femodel} = P_{sca} P_{cvolume}.$$

Сила сопротивления, усредненная по массе потока, которая действует на конструкцию, содержащую контрольный объем, подсчитывается по формуле

$$F_i^d = m_i D (v_i - v_{cg}),$$

где  $F_i^d$  – сила сопротивления,  $m_i$  – узловая масса,  $v_i$  – узловая скорость,  $v_{cg}$  – средняя взвешенная по массе скорость конструкции, ограничивающей контрольный объем,  $D$  – коэффициент торможения потока.

Альтернативное, независимое описание сопротивления основано на понятии давления остановленного потока. Это давление приблизительно равно максимальному давлению, которое действует на пластинку, ориентированную по нормали к стационарному потоку. Давление заторможенного потока определяется как  $p = \gamma \rho V^2$ , где  $V$  – нормальная скорость контрольного объема относительно скорости окружающего воздуха,  $\rho$  – плотность окружающего воздуха,  $\gamma$  – коэффициент, который выбирается пользователем в пределах от 0 до 1. Для предотвращения избыточного торможения потока рекомендуется выбирать небольшие значения.

**Входные данные для сенсора, включающего нагнетатель.**

**Данные вводятся только в случае, если параметр *RBID* не равен нулю.**

Если параметр *RBID* равен нулю, эти данные не вводятся. Если идентификатор абсолютно твердого тела не равен нулю, необходимо задать входные данные для пользовательской подпрограммы описания реакции сенсора (A) или задать данные для сенсора, выбранного по умолчанию (B).

Сенсор устанавливается на абсолютно твердом теле, связанном с конструкцией. Движение сенсора происходит в локальной системе координат, заданной для абсолютно твердого тела при описании его материала, см. \*MAT\_RIGID. Это важно, т.к. по умолчанию в качестве локальной системы координат берутся главные оси тензора инерции. Поворот и перенос локальной системы происходит вместе с абсолютно твердым телом. Если выполняется заданный пользователем критерий для развертывания подушки, устанавливается флаг-метка и начинается развертывание. В этом случае все задающие кривые, определяющие зависимость массового расхода от времени, сдвигаются на время инициирования.

**А. Входные данные для пользовательской подпрограммы (RBID>0).  
См. приложение В. Подпрограмма пользователя должна быть в наличии.**

Следующие карты используются для задания входных параметров для пользовательской подпрограммы. Для каждого контрольного объема можно использовать не более 25 параметров.

**Формат карты**

|            | 1   | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|------------|-----|---|---|---|---|---|---|---|
| Переменная | N   |   |   |   |   |   |   |   |
| Тип        | I   |   |   |   |   |   |   |   |
| Умолчание  | нет |   |   |   |   |   |   |   |

**Формат карты (для подпрограммы пользователя задается не более 25 констант; вводится только необходимое число карт, т.е. например, 9 констант задаются на 2 картах)**

|            | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6 | 7 | 8 |
|------------|----|----|----|----|----|---|---|---|
| Переменная | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 |   |   |   |
| Тип        | F  | F  | F  | F  | F  |   |   |   |
| Умолчание  | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. |   |   |   |

**ПЕРЕМЕННАЯ**

**ОПИСАНИЕ**

N

Число вводимых параметров (не более 25)

C1,...,CN

Не более 25 констант для подпрограммы пользователя

**В. Входные данные для сенсора, встроенного в программу LS-DYNA (RBID<0).**

Следующие три карты используются для задания входных параметров для встроенной подпрограммы функционирования сенсора.

**Активизация ускорения/скорости/смещения**

|            | 1  | 2  | 3  | 4    | 5    | 6 | 7 | 8 |
|------------|----|----|----|------|------|---|---|---|
| Переменная | AX | AY | AZ | AMAG | TDUR |   |   |   |
| Тип        | F  | F  | F  | F    | F    |   |   |   |
| Умолчение  | 0. | 0. | 0. | 0.   | 0.   |   |   |   |

|            | 1   | 2   | 3   | 4     | 5 | 6 | 7 | 8 |
|------------|-----|-----|-----|-------|---|---|---|---|
| Переменная | DVX | DVY | DVZ | DVMAG |   |   |   |   |
| Тип        | F   | F   | F   | F     |   |   |   |   |
| Умолчение  | 0.  | 0.  | 0.  | 0.    |   |   |   |   |

|            | 1  | 2  | 3  | 4    | 5 | 6 | 7 | 8 |
|------------|----|----|----|------|---|---|---|---|
| Переменная | UX | UY | UZ | UMAG |   |   |   |   |
| Тип        | F  | F  | F  | F    |   |   |   |   |
| Умолчение  | 0. | 0. | 0. | 0.   |   |   |   |   |

| <b><u>ПЕРЕМЕННАЯ</u></b> | <b><u>ОПИСАНИЕ</u></b>  |
|--------------------------|---|
| AX                       | Уровень ускорения вдоль оси X локальной системы координат, вызывающий включение нагнетателя. Используется абсолютное значение ускорения по оси X.<br>= 0: опция не активирована |
| AY                       | Уровень ускорения вдоль оси Y локальной системы координат, вызывающий включение нагнетателя. Используется абсолютное значение ускорения по оси Y.<br>= 0: опция не активирована |
| AZ                       | Уровень ускорения вдоль оси Z локальной системы координат, вызывающий включение нагнетателя. Используется абсолютное значение ускорения по оси Z.<br>= 0: опция не активирована |
| AMAG                     | Величина ускорения, необходимого для включения нагнетателя<br>= 0: опция не активирована  |
| TDUR                     | Время действия ускорения, при превышении которого включается нагнетатель. Это интегральное время от начала расчета, т.е. это время не является непрерывным.                     |
| DVX                      | Изменение скорости вдоль оси X, вызывающее включение нагнетателя. Используется абсолютное значение изменения скорости.<br>= 0: опция не активирована                            |
| DVY                      | Изменение скорости вдоль оси Y, вызывающее включение нагнетателя. Используется абсолютное значение изменения скорости.<br>= 0: опция не активирована                            |
| DVZ                      | Изменение скорости вдоль оси Z, вызывающее включение нагнетателя. Используется абсолютное значение изменения скорости.<br>= 0: опция не активирована                            |
| DVMAG                    | Величина изменения скорости, необходимого для включения нагнетателя.<br>= 0: опция не активирована  |
| UX                       | Приращение смещения вдоль оси X, вызывающее включение нагнетателя. Используется абсолютное значение смещения вдоль оси X.<br>= 0: опция не активирована                         |
| UY                       | Приращение смещения вдоль оси Y, вызывающее включение нагнетателя. Используется абсолютное значение смещения вдоль оси Y.<br>= 0: опция не активирована                         |

| <u>ПЕРЕМЕННАЯ</u> | <u>ОПИСАНИЕ</u>  |
|-------------------|--|
| UZ                | Приращение смещения вдоль оси Z, вызывающее включение нагнетателя.<br>Используется абсолютное значение смещения вдоль оси Z.<br>= 0: опция не активирована |
| UMAG              | Величина смещения, необходимого для включения нагнетателя.<br>= 0: опция не активирована   |

### Дополнительная карта для опции SIMPLE\_PRESSURE\_VOLUME

|            | 1   | 2    | 3    | 4      | 5 | 6 | 7 | 8 |
|------------|-----|------|------|--------|---|---|---|---|
| Переменная | CN  | BETA | LCID | LCIDDR |   |   |   |   |
| Тип        | F   | F    | I    | I      |   |   |   |   |
| Умолчание  | Нет | нет  | нет  | 0      |   |   |   |   |

| <u>ПЕРЕМЕННАЯ</u> | <u>ОПИСАНИЕ</u>   |
|-------------------|---|
| CN                | Коэффициент, задается в случае, если идентификатор задающей кривой LCID не определен.<br>< 0.0:  CN  - это идентификатор задающей кривой, которая определяет этот коэффициент, как функцию времени. |
| BETA              | Коэффициент пересчета $\beta$ . Задается в случае, если идентификатор задающей кривой не определен.   |
| LCID              | Идентификатор необязательной задающей кривой, определяющей зависимость давления от относительного объема  |
| LCIDDR            | Идентификатор необязательной задающей кривой, определяющей коэффициент CN, как функцию времени на стадии динамической релаксации  |

### Примечания:

Используются соотношения следующего вида:

$$\text{Давление} = \beta \frac{CN}{\text{Относительный объем}},$$

$$\text{Относительный объем} = \frac{\text{Текущий объем}}{\text{Начальный объем}}$$

## \*AIRBAG

---

Давление, таким образом, является функцией отношения текущего объема к начальному объему. Константа CN используется для задания соотношения, известного из литературы. Коэффициент пересчета  $\beta$  используется просто для приведения заданных величин к одному масштабу. Эту простую модель можно использовать в случае, если задано начальное давление и не учитывается утечка газа, температура и массовый поток на входе. Обычно она применяется для моделирования поведения воздуха в автомобильных шинах.

Задающая кривая LCIDDR может быть использована для постепенного повышения давления на этапе динамической релаксации, чтобы избежать колебаний после достижения необходимого давления газа. В разделе DEFINE\_CURVE эта задающая кривая должна быть помечена как относящаяся к динамической релаксации. После инициирования процесса для регулирования давления используется либо константа, либо идентификатор задающей кривой [CN].

### Дополнительные карты для опции SIMPLE\_AIRBAG\_MODEL

Карта 1

|  |   |   |   |   |   |   |   |   |
|--|---|---|---|---|---|---|---|---|
|  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--|---|---|---|---|---|---|---|---|

|            |     |     |     |      |     |     |     |     |
|------------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| Переменная | CV  | CP  | T   | LCID | MU  | A   | PE  | RO  |
| Тип        | F   | F   | F   | I    | F   | F   | F   | F   |
| Умолчание  | нет | нет | нет | нет  | нет | нет | нет | нет |

Карта 2

|            |     |           |           |           |           |           |  |  |
|------------|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--|--|
| Переменная | LOU | TEXT      | A         | B         | MW        | GASC      |  |  |
| Тип        | I   | F         | F         | F         | F         | F         |  |  |
| умолчание  | 0   | 0.        | 0.        | 0.        | 0.        | 0.        |  |  |
| Примечания | 0   | необязат. | необязат. | необязат. | необязат. | необязат. |  |  |

### ПЕРЕМЕННАЯ

### ОПИСАНИЕ

---

|    |                                      |
|----|--------------------------------------|
| CP | Теплоемкость при постоянном давлении |
| CV | Теплоемкость при постоянном объеме   |
| T  | Температура поступающего воздуха     |

| <b><u>ПЕРЕМЕННАЯ</u></b> | <b><u>ОПИСАНИЕ</u></b>  |
|--------------------------|---|
| LCID                     | Идентификатор задающей кривой, определяющей массовый расход на входе. См. раздел *DEFINE_CURVE.   |
| MU                       | Форм-фактор для выходного отверстия $\mu$ :<br>< 0.0: $ \mu $ - номер задающей кривой, определяющей форм-фактор как функцию абсолютного давления  |
| A                        | Площадь выходного отверстия $A$ :<br>$\geq 0.0$ : $A$ – это площадь выходного отверстия, не зависящая от времени,<br>< 0.0: $ A $ - это номер задающей кривой, определяющей площадь выходного отверстия как функцию абсолютного давления. |
| PE                       | Давление окружающего воздуха $p_e$  |
| RO                       | Плотность окружающего воздуха $\rho$  |
| LOU                      | Идентификатор <b>необязательной</b> задающей кривой, определяющей зависимость массового расхода на выходе от манометрического давления в подушке. См. *DEFINE_CURVE.  |
| TEXT                     | Температура окружающего воздуха (задается только в случае, если CV=0)   |
| A                        | Первый коэффициент в формуле для теплоемкости нагнетаемого воздуха (например, Дж/моль/°K) (задается только в случае, если CV=0)   |
| B                        | Второй коэффициент в формуле для теплоемкости нагнетаемого воздуха (например, Дж/моль/°K <sup>2</sup> ) (задается только в случае, если CV=0)   |
| MW                       | Молекулярный вес нагнетаемого воздуха (например, кг/моль) (задается только в случае, если CV=0)   |
| GASC                     | Универсальная газовая постоянная нагнетаемого воздуха (например, 8.314 Дж/моль/°K) (задается только в случае, если CV=0)  |

### **Замечания**

Уравнение состояния для определения давления в подушке безопасности имеет вид:

$$p = (\gamma - 1) \rho e,$$

где  $p$  – давление,  $\rho$  - плотность,  $e$  - удельная внутренняя энергия газа,  $\gamma$  - отношение удельных теплоемкостей:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

Из условия сохранения массы, скорость изменения массы, втекающей в подушку, задается следующим образом:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{dM_{in}}{dt} - \frac{dM_{out}}{dt}$$

Массовый расход на входе задается идентификатором задающей кривой LCID. Утечку, или массовый расход на выходе, можно моделировать двумя способами. Первый способ состоит в задании площади выходного отверстия с соответствующим форм-фактором и последующим занулением идентификатора задающей кривой LOU. Второй состоит в задании массового расхода на выходе с помощью некоторой задающей кривой с последующим одновременным занулением  $\mu$  и  $A$ .

Если  $CV=0$ , то удельная теплоемкость изобарического процесса (при постоянном давлении) определяется по формуле

$$c_p = \frac{(a + bT)}{MW},$$

а удельная теплоемкость в изохорическом процессе (при постоянном объеме) определяется соотношением:

$$c_v = c_p - \frac{R}{MW}$$

#### Дополнительная карта для опции ADIABATIC\_GAS\_MODEL

|            | 1   | 2    | 3     | 4   | 5   | 6   | 7 | 8 |
|------------|-----|------|-------|-----|-----|-----|---|---|
| Переменная | PSF | LCID | GAMMA | P0  | PE  | RO  |   |   |
| Тип        | F   | I    | F     | F   | F   | F   |   |   |
| Умолчение  | 1.0 | нет  | нет   | нет | нет | нет |   |   |

| <u>ПЕРЕМЕННАЯ</u> | <u>ОПИСАНИЕ</u>   |
|-------------------|---|
| PSF               | Коэффициент пересчета давления  |
| LCID              | Дополнительная задающая кривая для признака предварительной (начальной) нагрузки. См. раздел *DEFINE_CURVE. |
| GAMMA             | Отношение удельных теплоемкостей  |
| P0                | Начальное давление (манометрическое)  |
| PE                | Давление окружающего воздуха  |
| RO                | Начальная плотность газа  |

### Примечания:

Идентификатор задающей кривой LCID определяет метку предварительной (начальной) нагрузки. На этапе предварительного нагружения значение функции нагрузка-время равно нулю, и давление в контрольном объеме определяется по формуле:

$$p = PSFp_0.$$

Как только появляется **первое ненулевое** значение функции, этап предварительного нагружения заканчивается, и далее до конца анализа используется закон для идеального газа. Если LCID = 0, предварительное нагружение отсутствует.

Давление после предварительного нагружения определяется по уравнению состояния для адиабатически расширяющегося идеального газа:

$$p = (\gamma - 1) \rho e,$$

где  $p$  - давление,  $\rho$  - плотность,  $e$  – удельная внутренняя энергия газа,  $\gamma$  - отношение удельных теплоемкостей:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}.$$

Указанное выше давление – это абсолютное давление. Результирующее давление, действующее на контрольный объем,

$$p_s = PSF(p - p_e),$$

где PSF – коэффициент пересчета давления. При наличии начального давления  $p_0$  соответствующая ему внутренняя энергия равна

$$e_0 = \frac{p_0 + p_e}{\rho(\gamma - 1)}.$$

# \*AIRBAG

---

## Дополнительные 4 карты для всех моделей Ванга-Нефске (опции WANG\_NEFSKE)

Карта 1            1            2            3            4            5            6            7            8

|            |     |     |    |     |      |      |      |           |
|------------|-----|-----|----|-----|------|------|------|-----------|
| Переменная | CV  | CP  | T  | LCT | LCMT | TVOL | LCDT | IABT      |
| Тип        | F   | F   | F  | I   | I    | F    | I    | F         |
| Умолчение  | нет | нет | 0. | 0   | нет  | 0.   | 0.   | не испол. |

Карта 2            1            2            3            4            5            6            7            8

|            |     |       |     |       |      |        |      |        |
|------------|-----|-------|-----|-------|------|--------|------|--------|
| Переменная | C23 | LCC23 | A23 | LCA23 | CP23 | LCCP23 | AP23 | LCAP23 |
| Тип        | F   | I     | F   | I     | F    | I      | F    | I      |
| Умолчение  | нет | 0     | нет | 0     | нет  | 0      | 0.0  | 0      |

Карта 3            1            2            3            4            5            6            7            8

|            |     |     |     |       |       |      |     |       |
|------------|-----|-----|-----|-------|-------|------|-----|-------|
| Переменная | PE  | RO  | GC  | LCEFR | POVER | PPOP | OPT | KNKDN |
| Тип        | F   | F   | F   | I     | F     | F    | F   | I     |
| Умолчение  | нет | нет | нет | 0     | 0.0   | 0.0  | 0.0 | 0     |

Следующую карту необходимо ввести, если моделируется нагнетатель, LCMT=0. Если нет, эта карта все равно вводится, но заполняется пробелами.

Карта 4            1            2            3            4            5            6            7            8

|            |     |     |      |     |     |      |  |  |
|------------|-----|-----|------|-----|-----|------|--|--|
| Переменная | IOC | IOA | IVOL | IRO | IT  | LCBF |  |  |
| Тип        | F   | F   | F    | F   | F   | I    |  |  |
| Умолчание  | нет | нет | нет  | нет | нет | нет  |  |  |

Следующая карта вводится только в случае, если CV=0. Она используется для задания зависимости удельной теплоемкости от температуры. См. ниже.

Карта 5            1            2            3            4            5            6            7            8

|            |      |     |     |     |      |  |  |  |
|------------|------|-----|-----|-----|------|--|--|--|
| Переменная | TEXT | A   | B   | MW  | GASC |  |  |  |
| Тип        | F    | F   | F   | F   | F    |  |  |  |
| Умолчание  | нет  | нет | нет | нет | нет  |  |  |  |

Следующая карта вводится только в случае, если задана опция POP. Эта опция используется для задания дополнительных критериев для инициирования выходного потока из подушки.

Карта 5            1            2            3            4            5            6            7            8

|            |     |     |     |     |       |       |     |       |
|------------|-----|-----|-----|-----|-------|-------|-----|-------|
| Переменная | TDP | AXP | AYP | AZP | AMAGP | TDURP | TDA | RBIDP |
| Тип        | F   | F   | F   | F   | F     | F     | F   | I     |
| Умолчание  | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0   | 0.0   | 0.0 | нет   |

| <b><u>ПЕРЕМЕННАЯ</u></b> | <b><u>ОПИСАНИЕ</u></b>  |
|--------------------------|---|
| CV                       | Теплоемкость при постоянном объеме  |
| CP                       | Теплоемкость при постоянном давлении  |
| T                        | Температура поступающего газа. Изменения температуры могут быть определены с помощью задающей кривой LCT.   |
| LCT                      | Номер необязательной задающей кривой, определяющей зависимость температуры поступающего газа от времени. При этом отменяются значения в столбцах T.   |
| LCMT                     | Задающая кривая, определяющая зависимость расхода на входе или давления в резервуаре от времени. Если объем резервуара TVOL не равен нулю, то кривая задает зависимость давления в резервуаре от времени. Если LCMT=0, то необходимо моделировать нагнетатель, см. карту 4. На этапе динамической релаксации подушка игнорируется до появления флага-признака ввода в действие этой кривой при динамической релаксации. |
| TVOL                     | Объем резервуара, который нужен только для задания кривой LCMT, определяющей зависимость давления в резервуаре от времени   |
| LCDT                     | Задающая кривая для временной зависимости скорости изменения температуры (dT/dt)  |
| IABT                     | Начальная температура подушки (необязательная переменная, обычно не задается)   |
| C23                      | Коэффициент пропускания выходного отверстия. Задается равным нулю, если задана переменная LCC23 (см. ниже).   |
| LCC23                    | Номер задающей кривой, определяющей зависимость коэффициента пропускания выходного отверстия от времени. Ненулевое значение переменной C23 отменяет значение LCC23.   |
| A23                      | Площадь пропускания выходного отверстия. Задается равным нулю, если затем задана переменная LCA23 (см. ниже).   |
| LCA23                    | Номер задающей кривой, определяющей зависимость коэффициента пропускания выходного отверстия от <u>абсолютного</u> давления. Ненулевое значение переменной A23 отменяет значение LCA23.   |
| CP23                     | Коэффициент пропускания при утечке за счет пористости ткани. Задается равным нулю, если задана переменная LCCP23 (см. ниже).  |
| LCCP23                   | Номер задающей кривой, определяющей зависимость от времени коэффициента пропускания при утечке за счет пористости ткани. Ненулевое значение переменной CP23 отменяет значение LCCP23.   |

| <b><u>ПЕРЕМЕННАЯ</u></b> | <b><u>ОПИСАНИЕ</u></b>  |
|--------------------------|---|
| AP23                     | Площадь утечки за счет пористости ткани   |
| LCAP23                   | Номер задающей кривой, определяющей площадь утечки за счет пористости ткани как функцию (абсолютного) давления. Ненулевое значение переменной AP23 отменяет значение LCAP23.  |
| PE                       | Давление окружающего воздуха  |
| RO                       | Плотность окружающего воздуха   |
| GC                       | Коэффициент пересчета гравитационной постоянной (по умолчанию не задается). Если для всех параметров подушки используется согласованная система величин, то следует задать единицу.   |
| LCEFR                    | Необязательная кривая, описывающая зависимость расхода на выходе от манометрического давления   |
| POVER                    | Начальное относительное избыточное давление (манометрическое) Pover в контрольном объеме  |
| PROF                     | Относительное давление (манометрическое) Prof, достаточное для инициирования выходного течения  |
| OPT                      | Утечка газа через ткань подушки. Значение переменной устанавливается в нуль, если переменные CP23, LCCP23, AP23 и LCAP23 отличны от нуля.<br>= 1: выход газа из отверстия описывается формулами Ванга-Нефске. Запирание не учитывается.<br>= 2: выход газа из отверстия описывается формулами Ванга-Нефске. Учитывается запирание проходного сечения за счет контактного взаимодействия.<br>= 3: утечка газа описывается формулами работы [50]. Запирание не учитывается.<br>= 4: утечка газа описывается формулами [50]. Учитывается запирание проходного сечения за счет контактного взаимодействия.<br>= 5: утечка газа описывается формулами для течения в пористой среде. Запирание не учитывается.<br>= 6: утечка газа описывается формулами для течения в пористой среде. Учитывается запирание проходного сечения за счет контактного взаимодействия. |

ПЕРЕМЕННАЯ

ОПИСАНИЕ

|       |   |
|-------|---|
| KNKDN | Идентификатор <u>необязательной</u> задающей кривой, которая определяет зависимость коэффициента пересчета для падения давления. Эта переменная используется только для описания процесса впуска. Коэффициент, определенный этой задающей кривой, используется для пересчета давления, действующего на те участки подушки, которые не находятся четко в прямой видимости струи. Как правило, вначале процесса этот коэффициент меньше единицы, а затем равен единице. К сегментам, которые находятся в прямой видимости струи, всегда прикладывается полное давление. |
| IOC   | Коэффициент пропускания отверстия нагнетателя   |
| IOA   | Площадь отверстия нагнетателя   |
| IVOL  | Объем нагнетаемого газа   |
| IRO   | Плотность нагнетаемого газа   |
| IT    | Температура нагнетаемого газа   |
| LCBF  | Задающая кривая, определяющая зависимость выгоревшей доли топлива от времени  |
| TEXT  | Температура окружающего воздуха   |
| A     | Первый коэффициент в формуле для теплоемкости накачиваемого газа (например, Дж/моль/°К)   |
| B     | Второй коэффициент в формуле для теплоемкости накачиваемого газа (например, Дж/моль/°К <sup>2</sup> )   |
| MW    | Молекулярный вес нагнетаемого газа (например, кг/моль)  |
| GASC  | Универсальная газовая постоянная нагнетаемого газа (например, 8.314 Дж/моль/°К)   |
| TDP   | Время задержки перед иницированием выходного потока после достижения давления POP   |
| AXP   | Величина ускорения POP вдоль оси X локальной системы координат<br>= 0.0: опция не активирована  |
| AYP   | Величина ускорения POP вдоль оси Y локальной системы координат<br>= 0.0: опция не активирована  |

| <b><u>ПЕРЕМЕННАЯ</u></b> | <b><u>ОПИСАНИЕ</u></b>   |
|--------------------------|--|
| AZP                      | Величина ускорения POP вдоль оси Z локальной системы координат = 0.0: опция не активирована  |
| AMAGP                    | Величина ускорения POP = 0.0: опция не активирована  |
| TDURP                    | Время действия ускорения POP, при превышении которого инициируется выходной поток. Это интегральное время от начала расчета, т.е. оно не является непрерывным. |
| TDA                      | Время задержки перед инициированием выходного потока после того, как было превышено заданное время действия ускорения POP                                      |
| RBIDP                    | Идентификатор части абсолютно твердого тела, используемого для сравнения значений ускорения с ускорением POP   |

**Примечания:**

Давление после предварительного нагружения определяется из уравнения состояния для адиабатического расширения идеального газа:

$$p = (\gamma - 1) \rho e,$$

где  $p$  - давление,  $\rho$  - плотность,  $e$  – удельная внутренняя энергия газа,  $\gamma$  - отношение удельных теплоемкостей

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v},$$

где  $c_v$  – удельная теплоемкость при постоянном объеме,  $c_p$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении. Соотношение для давления задается в виде

$$Q = \frac{p_e}{p},$$

где  $p_e$  – внешнее давление и  $p$  – внутренне давление в подушке. Соотношение для критического давления определяется по формуле

$$Q_{crit} = \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma / (\gamma - 1)},$$

где  $\gamma$  - отношение удельных теплоемкостей:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}.$$

Если

$$Q \leq Q_{crit}, \quad \text{то } Q = Q_{crit}.$$

Уравнения Ванга-Нефске для потока через воздушные клапаны и при утечке имеют вид

$$\dot{m}_{23} = C_{23} A_{23} \frac{p}{R\sqrt{T_2}} Q^{\gamma/\gamma} \sqrt{2g_c \left( \frac{\gamma R}{\gamma-1} \right) \left( 1 - Q^{\gamma-1/\gamma} \right)}$$

и

$$\dot{m}'_{23} = C'_{23} A'_{23} \frac{p}{R\sqrt{T_2}} Q^{\gamma/\gamma} \sqrt{2g_c \left( \frac{\gamma R}{\gamma-1} \right) \left( 1 - Q^{\gamma-1/\gamma} \right)}.$$

Следует заметить, что коэффициент пересчета гравитационной постоянной должен задаваться в согласованных единицах. В качестве альтернативы при расчете расхода на выходе по модели Ванга-Нефске можно использовать кривую для расхода на выходе в зависимости от внутреннего давления. Тогда не нужно задавать параметры C23, LCC23, A23, LCA23, CP23, LCCP23, AP23 и LCAP23.

При моделировании нагнетателя предполагается, что его контрольный объем не меняется и количество выгоревшего топлива может быть задано пользователем в виде табличной кривой зависимости коэффициента выгорания от времени. Соотношение для объема имеет вид:

$$Q_{crit} = \frac{p_c}{p_i} = \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}},$$

где  $p_c$  - критическое давление, при котором возникает течение со звуковой скоростью,  $p_i$  - давление нагнетателя. Давление на выходе задается следующими соотношениями:

$$p_e = p_a \text{ if } p_a \geq p_c,$$
$$p_e = p_c \text{ if } p_a < p_c,$$

где  $p_a$  - давление в контрольном объеме. Приток газа в контрольный объем описывается уравнением

$$\dot{m}_{in} = C_o A_o \sqrt{2 p_i \rho_i} \sqrt{\frac{g_c \gamma \left( Q^{\frac{2}{\gamma}} - Q^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right)}{\gamma-1}},$$

где  $C_o$ ,  $A_o$  и  $\rho_i$  - коэффициент пропускания, площадь отверстия нагнетателя и плотность газа соответственно.

Если задана переменная ОПТ, то если она равна 1 или 2, расход на выходе из подушки  $\dot{m}_{out}$  записывается следующим образом:

$$\dot{m}_{out} = \sqrt{g_c} \cdot \left[ \sum_{n=1}^{nairmats} (FLC(t)_n \cdot FAC(p)_n \cdot Area_n) \right] \cdot \sqrt{2p\rho} \sqrt{\frac{\gamma \left( Q^{\frac{2}{k}} - Q^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right)}{\gamma - 1}},$$

где  $\rho$  - плотность газа в подушке,  $nairmats$  – число тканей, используемых в подушке,  $Area_n$  – текущая площадь открытого участка ткани с номером n.

Если переменная ОПТ равна 3 или 4, то имеет место соотношение

$$\dot{m}_{out} = \left[ \sum_{n=1}^{nairmats} (FLC(t)_n \cdot FAC(p)_n \cdot Area_n) \right] \cdot \sqrt{2(p - p_{ext})\rho}$$

и если 5 или 6, то

$$\dot{m}_{out} = \left[ \sum_{n=1}^{nairmats} (FLC(t)_n \cdot FAC(p)_n \cdot Area_n) \right] \cdot (p - p_{ext}).$$

Многотканевые подушки могут использовать один и тот же идентификатор части, поскольку площадь получается суммированием всех сегментов подушки, для которых известны идентификаторы соответствующих частей. В целях оптимизации вывода сейчас для каждой подушки можно задавать не более 10 материалов. Но при необходимости это ограничение можно снять.

Полный выходной поток из подушки будет включать и часть потока за счет пропускания, определяемого константами C23 и A23 или их задающими кривыми, описанными выше.

Если  $CV=0$ , то удельная теплоемкость при постоянном давлении записывается в виде

$$c_p = \frac{(a + bT)}{MW},$$

а удельная теплоемкость при постоянном объеме определяется соотношением

$$c_v = c_p - \frac{R}{MW}.$$

**Еще 2 карты для моделей впрыскивания струи**

Приведенные дополнительные карты задаются для опций WANG\_NEFSKE\_JETTING и WANG\_NEFSKE\_MULTIPLE\_JETTING, две последующих карты задаются для каждой опции. Струю можно определить заданием либо координат фокуса струи, конца вектора струи и вторичного фокуса струи, либо трех узлов, расположенных в этих точках. Если положение подушки меняется как функция времени, рекомендуется использовать узловые точки.

Задается любая из карт, но не обе сразу:

**Первая дополнительная карта из двух, необходимых для опции WANG\_NEFSKE\_JETTING**

Карта 1            1            2            3            4            5            6            7            8

|            |      |      |      |      |      |      |     |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|-----|------|
| Переменная | XJFP | YJFP | ZJFP | XJVH | YJVH | ZJVH | CA  | BETA |
| Тип        | F    | F    | F    | F    | F    | F    | F   | F    |
| Умолчание  | нет  | нет  | нет  | нет  | нет  | нет  | нет | 1.0  |
| Примечание | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    |     |      |

**Первая дополнительная карта из двух, необходимых для опции WANG\_NEFSKE\_MULTIPLE\_JETTING**

Карта 1            1            2            3            4            5            6            7            8

|            |      |      |      |      |      |      |       |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|-------|------|
| Переменная | XJFP | YJFP | ZJFP | XJVH | YJVH | ZJVH | LCJRV | BETA |
| Тип        | F    | F    | F    | F    | F    | F    | F     | F    |
| Умолчание  | нет   | 1.0  |
| Примечание | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    |       |      |

**Вторая дополнительная карта из двух, необходимых для опций WANG\_NEFSKE\_JETTING и WANG\_NEFSKE\_MULTIPLE\_JETTING**

Карта 2                    1                    2                    3                    4                    5                    6                    7                    8

|            |       |       |       |      |       |       |       |       |
|------------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| Переменная | XSJFP | YSJFP | ZSJFP | PSID | ANGLE | NODE1 | NODE2 | NODE3 |
| Тип        | F     | F     | F     | I    | F     | I     | I     | I     |
| Умолчение  | нет   | нет   | нет   | нет  | нет   | 0     | 0     | 0     |
| Примечание |       |       |       |      |       | 1     | 1     | 1     |

**ПЕРЕМЕННАЯ****ОПИСАНИЕ**

|       |  |
|-------|--|
| XJFP  | Координата $x$ фокуса струи, т.е. воображаемого ее начала на рис. 1.1. См. ниже замечание 1.   |
| YJFP  | Координата $y$ фокуса струи, т.е. воображаемого ее начала на рис. 1.1.   |
| ZJFP  | Координата $z$ фокуса струи, т.е. воображаемого ее начала на рис. 1.1.   |
| XJVH  | Координата $x$ конца вектора струи для определения оси конуса  |
| YJVH  | Координата $y$ конца вектора струи для определения оси конуса  |
| ZJVH  | Координата $z$ конца вектора струи для определения оси конуса  |
| CA    | Угол конуса $\alpha$ в радианах<br>< 0.0: $ \alpha $ - идентификатор задающей кривой, определяющей угол конуса как функцию <i>времени</i>  |
| LCJRV | Идентификатор задающей кривой, определяющей пространственное распределение относительной скорости струи, см. рис. 1.2 и 1.3. Скорость струи определяется по расходу на входе и пересчитывается по значению функции задающей кривой, соответствующему значению угла $\psi$ . Обычно значения задающей кривой изменяются от 0 до 1. См. *DEFINE_CURVE. |
| BETA  | Коэффициент эффективности $\beta$ для пересчета окончательного значения давления, полученного из уравнения Бернулли<br>< 0.0: $ \beta $ - идентификатор задающей кривой, определяющей коэффициент эффективности как функцию <i>времени</i>   |

| <u>ПЕРЕМЕННАЯ</u> | <u>ОПИСАНИЕ</u>  |
|-------------------|--|
| XSJFP             | Координата $x$ вторичного фокуса струи, подушка пассажира. Если координаты вторичного фокуса равны $(0,0,0)$ , предполагается коническая струя (подушка водителя).   |
| YSJFP             | Координата $y$ вторичного фокуса   |
| ZSJFP             | Координата $z$ вторичного фокуса   |
| PSID              | Идентификатор необязательного набора частей, см. *SET_PART. Если он равен нулю, все элементы включены в подушку.   |
| ANGLE             | Угол отсечки в градусах. Для углов, значение которых больше угла отсечки, относительная скорость струи полагается равной нулю. См. рисунок 1.3. Эта переменная используется только для многоструйной модели. |
| NODE1             | Идентификатор узла, расположенного в фокусе струи, т.е. воображаемое начало на рисунке 1.1. См. ниже замечание 1.  |
| NODE2             | Идентификатор узла на оси струи  |
| NODE3             | Идентификатор необязательного узла, расположенного во вторичном фокусе струи   |

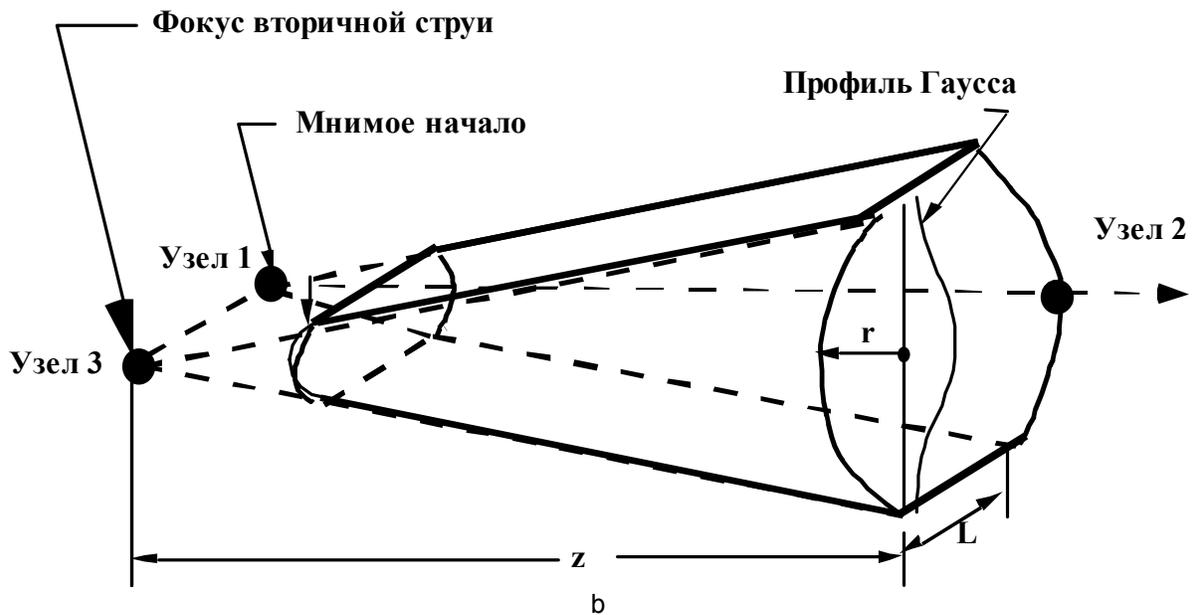
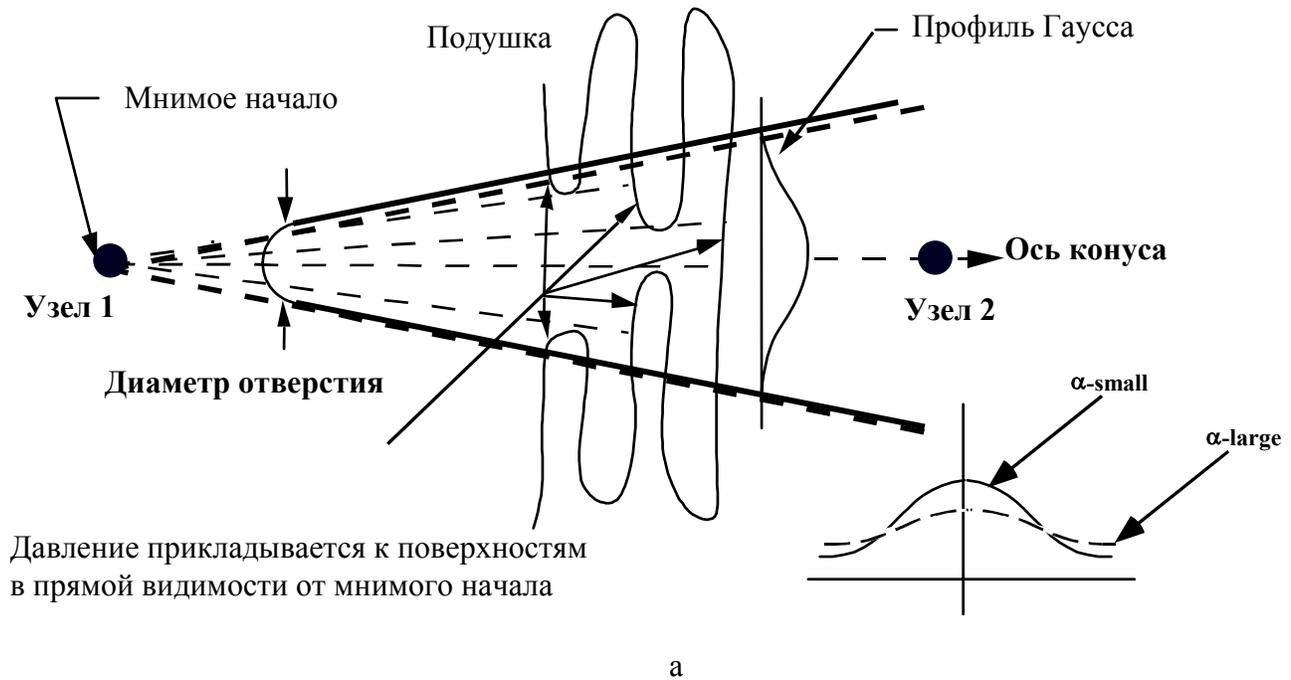
**Примечания:**

1. Предполагается, что направление струи определяется с помощью метода координат (XJFP, YJFP, ZJFP) и (XJVH, YJVH, ZJVH), если не заданы NODE1 и NODE2. В этом случае координаты узлов, заданных переменными NODE1, NODE2 и NODE3, заменяют значения XJFP, YJFP, ZJFP и XJVH, YJVH, ZJVH. Если подушка подчиняется движению абсолютно твердого тела, рекомендуется использовать узлы. Узлы должны быть связаны с автомобилем, чтобы координаты струи менялись в соответствии с движением автомобиля.

Опция впуска дает простую модель для расчета реального распределения давления в подушке в момент удара о препятствие и начала разворачивания подушки. Повышенное давление действует только на те поверхности, которые находятся в прямой видимости по отношению к воображаемому началу струи. С помощью необязательной задающей кривой LCRJV распределение давления может быть пересчитано в соответствии с так называемым распределением относительной скорости струи.

Для подушки пассажира конус заменяется клиновидной фигурой. Первичный и вторичный фокусы струи определяют грани клина, а угол  $\alpha$  определяет угол клина.

Вместо того чтобы прикладывать давление ко всем поверхностям в прямой видимости от воображаемого начала (начал), можно задать набор частей, к которым прикладывается давление.



**Рис. 1.1.** Геометрия струи для: а) подушки водителя (давление прикладывается в том случае, если центральная зона поверхности находится в прямой видимости) и б) подушки пассажира.

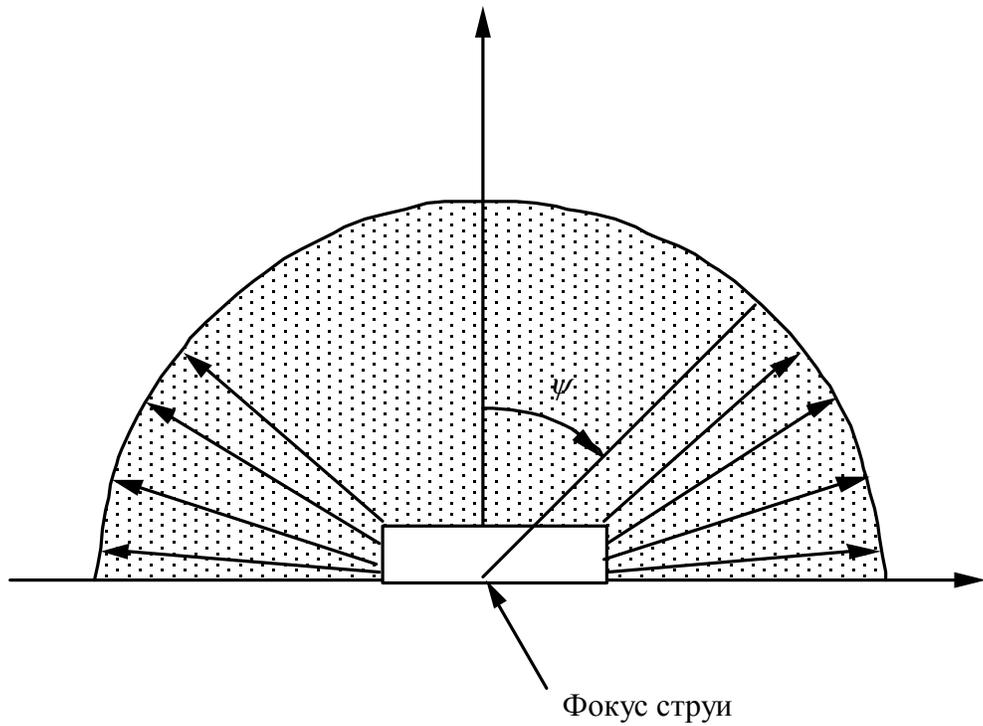


Рис. 1.2. Многоструйная модель для подушки водителя.

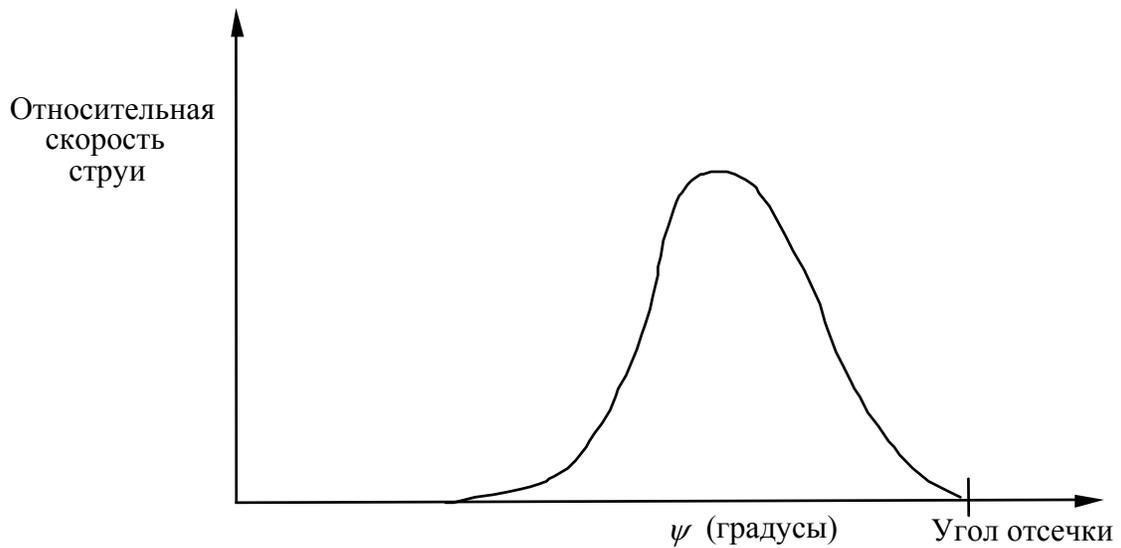


Рис. 1.3. Нормированная скорость струи относительно угла для многоструйной модели подушки водителя.

### Дополнительная карта для опции CM (Constant Momentum – постоянный импульс)

Следующая карта задается дополнительно для опций WANG\_NEFSKE\_JETTING\_CM и WANG\_NEFSKE\_MULTIPLE\_JETTING\_CM

### Дополнительная карта для опции \_CM

Карта 1                    1                    2                    3                    4                    5                    6                    7                    8

|            |        |  |  |  |  |  |  |  |  |
|------------|--------|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Переменная | NREACT |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Тип        | I      |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Умолчение  | нет    |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Примечание |        |  |  |  |  |  |  |  |  |

#### ПЕРЕМЕННАЯ

#### ОПИСАНИЕ

NREACT

Узел для приложения реактивной силы струи. Если переменная равна нулю, эта сила не будет учитываться.

#### Примечания:

По сравнению со стандартной формулировкой впуска газа в программе LS-DYNA, формулировка для постоянного импульса имеет несколько отличий. В этой формулировке впуск оказывает большее влияние на процесс разворачивания подушки: суммарная сила обычно больше, и она не уменьшается с расстоянием от струи.

Скорость на выходе струи полагается равной скорости адиабатического потока идеального газа и определяется акустическим приближением:

$$v_{outlet} = \sqrt{\gamma RT} = \sqrt{\left( \frac{(c_p - c_v) T c_p}{c_v} \right)}$$

Плотность в сопле рассчитывается из условия сохранения массы:

$$\rho_0 v_{outlet} A_{outlet} = \dot{m} .$$

Это отличается от стандартной формулировки впуска, где предполагается, что плотность газа в струе равна плотности атмосферного воздуха (скорость струи также рассчитывается из условия сохранения массы).

Распределение скорости на любом радиусе  $r$  от оси струи и на расстоянии  $z$  от фокуса  $v_{r,z}$  связано со скоростью на оси струи  $v_{r=0,z}$  так же, как в стандартной формулировке впрыскивания:

$$v_{r,z} = v_{r=0,z} e^{-\left(\frac{r}{\alpha z}\right)^2}$$

Скорость на оси струи  $v_{r=0}$  на расстоянии  $z$  от фокуса струи рассчитывается из условия сохранения импульса в струе.

Из условия, что импульс в сопле равен импульсу в точке  $z$ , следует

$$\begin{aligned} \rho_0 v_{\text{outlet}}^2 A_{\text{outlet}} &= \rho_0 \int v_{\text{jet}}^2 dA_{\text{jet}} \\ &= \rho_0 v_{r=0,z}^2 \left\{ b + F\sqrt{b} \right\}, \end{aligned}$$

где

$$b = \frac{\pi(\alpha z)^2}{2}$$

$F =$  расстояние между фокусами для подушки пассажира

Наконец, давление, приложенное к элементу подушки, который находится в пределах видимости струи, записывается следующим образом:

$$p_{r,z} = \beta \rho_0 v_{r,z}^2$$

Объединяя приведенные выше уравнения, получим

$$p_{r,z} = \frac{\beta \dot{m} v_{\text{outlet}} \left[ e^{-(r/\alpha z)^2} \right]^2}{\left\{ \frac{\pi(\alpha z)^2}{2} + F\sqrt{\frac{\pi(\alpha z)^2}{2}} \right\}}$$

Суммарная сила струи:

$$F_{\text{jet}} = \dot{m} v_{\text{outlet}} \quad (\text{не зависит от расстояния от сопла}).$$

Условие сохранения массы в струе может не выполняться из-за того, что струя увлекает газ из окружающего объема. В этом отличие от стандартной формулировки впуска, где масса сохраняется, а импульс нет. Результатом этого является уменьшение силы струи с расстоянием от сопла.

Силы при впуске могут быть приведены к узлу NREACT, чтобы моделировать реактивное усилие на рулевой колонке или скобах крепления. Усилие записывается в файл ABSTAT в формате ASCII и в файл XTF в двоичном формате.

### Дополнительная карта для опции LINEAR\_FLUID

|            | 1    | 2   | 3     | 4          | 5          | 6          | 7          | 8    |
|------------|------|-----|-------|------------|------------|------------|------------|------|
| Переменная | BULK | RO  | LCINT | LCOUTT     | LCOUTP     | LCFIT      | LCBULK     | LCID |
| Тип        | F    | F   | I     | I          | I          | I          | I          | I    |
| Умолчание  | нет  | нет | нет   | не обязат. | не обязат. | не обязат. | не обязат. | нет  |

#### ПЕРЕМЕННАЯ

#### ОПИСАНИЕ

|        |  |
|--------|--|
| BULK   | Объемный модуль $K$ среды в контрольном объеме. Константа, зависящая от времени. Задается, если $LCBULK=0$ .   |
| RO     | $\rho$ , плотность среды   |
| LCINT  | $F(t)$ - кривая входного потока, определяющая зависимость массы в единицу времени как функцию времени, см. *DEFINE_CURVE.                            |
| LCOUTT | $G(t)$ - кривая выходного потока, определяющая зависимость массы в единицу времени как функцию времени. Эта задающая кривая является необязательной. |
| LCOUTP | $H(p)$ - кривая выходного потока, определяющая зависимость массы в единицу времени от давления. Эта задающая кривая является дополнительной.         |
| LCFIT  | $L(t)$ - добавочное давление как функция времени. Эта задающая кривая является необязательной.   |
| LCBULK | Кривая, определяющая зависимость объемного модуля от времени. Эта необязательная кривая, но если она задана, то константа BULK не используется.      |
| LCID   | Идентификатор задающей кривой, определяющей зависимость давления от времени, см. *DEFINE_CURVE.  |

**Примечания:**

Если LCID = 0, давление определяется по формуле

$$P(t) = K(t) \ln \left( \frac{V_0(t)}{V(t)} \right) + L(t),$$

где

$P(t)$  - давление,

$V(t)$  - объем среды в сжатом состоянии,

$V_0(t) = V_0(t) = \frac{M(t)}{\rho}$  - объем среды в несжатом состоянии,

$M(t) = M(0) + \int F(t) dt - \int G(t) dt - \int H(p) dt$  - масса среды в момент времени  $t$ ,

$M(0) = V(0)\rho$  - масса среды в момент времени 0,  $P(0) = 0$ .

Полагая параметр LCID  $\neq 0$ , можно задать динамику изменения давления в контрольном объеме, и тогда масса жидкости в этом объеме определяются по объему и плотности.

Эта модель используется для моделирования процесса штампования в жидкости или аналогичных процессов. Давление определяется по массе, втекающей в объем, и текущему объему. Давление к контрольному объему прикладывается равномерно.

Обратите внимание на знаки в уравнении для слагаемого  $M(t)$ . Массовый поток должен быть всегда положительным, поскольку выходной поток всегда вычитается.

**Дополнительные карты для опций HYBRID и HYBRID\_JETTING**

|            | 1      | 2      | 3      | 4   | 5   | 6 | 7 | 8 |
|------------|--------|--------|--------|-----|-----|---|---|---|
| Переменная | ATMOST | ATMOSP | ATMOSD | GC  | CC  |   |   |   |
| Тип        | F      | F      | F      | F   | F   |   |   |   |
| Умолчение  | нет    | нет    | нет    | нет | 1.0 |   |   |   |

|            | 1   | 2     | 3   | 4     | 5    | 6     | 7    | 8      |
|------------|-----|-------|-----|-------|------|-------|------|--------|
| Переменная | C23 | LCC23 | A23 | LCA23 | CP23 | LCP23 | AP23 | LCAP23 |
| Тип        | F   | I     | F   | I     | F    | I     | F    | I      |
| Умолчение  | нет | 0     | нет | 0     | нет  | 0     | нет  | 0      |

|            | 1   | 2     | 3    | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|------------|-----|-------|------|---|---|---|---|---|
| Переменная | OPT | PVENT | NGAS |   |   |   |   |   |
| Тип        | I   | F     | I    |   |   |   |   |   |
| Умолчение  | нет | нет   | нет  |   |   |   |   |   |

## \*AIRBAG

---

Вводятся всего 2\*NGAS карт, которые показаны ниже. Для каждого типа газа необходимо ввести по две карты.

|            | 1     | 2     | 3       | 4   | 5     | 6   | 7   | 8   |
|------------|-------|-------|---------|-----|-------|-----|-----|-----|
| Переменная | LCIDM | LCIDT |         | MW  | INITM | A   | B   | C   |
| Тип        | I     | I     | F       | F   | F     | F   | F   | F   |
| Умолчение  | нет   | нет   | не исп. | нет | нет   | нет | нет | нет |

|            | 1     | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|------------|-------|---|---|---|---|---|---|---|
| Переменная | FMASS |   |   |   |   |   |   |   |
| Тип        | F     |   |   |   |   |   |   |   |
| Умолчение  | нет   |   |   |   |   |   |   |   |

### ПЕРЕМЕННАЯ

### ОПИСАНИЕ

---

|        |  |
|--------|--|
| ATMOST | Температура атмосферного воздуха   |
| ATMOSP | Давление атмосферного воздуха  |
| ATMOSD | Плотность атмосферного воздуха   |
| GC     | Универсальная газовая постоянная   |
| CC     | Константа преобразования<br>= .0: устанавливается равной 1.0   |
| C23    | Коэффициент пропускания выходного отверстия. Полагается равным нулю, если задана переменная LCC23 (см. ниже).  |
| LCC23  | Номер задающей кривой, определяющей зависимость коэффициента пропускания выходного отверстия от времени. Ненулевое значение переменной C23 отменяет значение переменной LCC23. |

| <u>ПЕРЕМЕННАЯ</u> | <u>ОПИСАНИЕ</u>   |
|-------------------|---|
| A23               | Площадь пропускания выходного отверстия. Параметр полагается равным нулю, если задана переменная LCA23 (см. ниже).  |
| LCA23             | Номер задающей кривой, определяющей площадь пропускания выходного отверстия как функцию <u>абсолютного</u> давления. Ненулевое значение переменной для A23 отменяет значение переменной LCA23.  |
| CP23              | Коэффициент пропускания при утечке за счет пористости ткани. Полагается равным нулю, если задана переменная LCCP23 (см. ниже).  |
| LCCP23            | Номер задающей кривой, определяющей зависимость коэффициента пропускания при утечке за счет пористости ткани от времени. Ненулевое значение переменной CP23 отменяет значение переменной LCCP23.  |
| AP23              | Площадь утечки за счет пористости ткани   |
| LCAP23            | Номер задающей кривой, определяющей зависимость площади утечки за счет пористости ткани от абсолютного давления. Ненулевое значение переменной AP23 отменяет значение переменной LCAP23.  |
| OPT               | Утечка газа через ткань подушки. Если переменные CP23, LCCP23, AP23 и LCAP23 отличны от нуля, то значение переменной устанавливается в нуль.<br>= 1: выход газа из отверстия описывается формулами Ванга-Нефске. Запирание не учитывается.<br>= 2: выход газа из отверстия описывается формулами Ванга-Нефске. Учитывается запирание пропускающей поверхности за счет контактного взаимодействия.<br>= 3: утечка газа описывается формулами работы [50]. Запирание не учитывается.<br>= 4: утечка газа описывается формулами работы [50]. Учитывается запирание пропускающей поверхности за счет контактного взаимодействия.<br>= 5: утечка газа описывается формулами для течения в пористой среде. Запирание не учитывается.<br>= 6: утечка газа описывается формулами для течения в пористой среде. Учитывается запирание пропускающей поверхности за счет контактного взаимодействия. |
| PVENT             | Манометрическое давление в момент начала утечки   |
| NGAS              | Число типов газа, для которых ниже вводятся данные (включая первоначальный воздух)  |

| <u>ПЕРЕМЕННАЯ</u> | <u>ОПИСАНИЕ</u>   |
|-------------------|---|
| LCIDM             | Идентификатор задающей кривой для массового расхода нагнетаемого газа (= 0 для газа в подушке в момент времени 0).<br>> 0: кусочно-линейная интерполяция,<br>< 0: интерполяция с помощью кубического сплайна. |
| LCIDT             | Идентификатор задающей кривой для температуры нагнетаемого газа (= 0 для газа в подушке в момент времени 0)<br>> 0: кусочно-линейная интерполяция,<br>< 0: интерполяция с помощью кубического сплайна.        |
| BLANK             | (не используется)   |
| MW                | Молекулярный вес  |
| INITM             | Начальная массовая доля газового компонента   |
| A                 | Коэффициент для молярной теплоемкости нагнетаемого воздуха при постоянном давлении (например, Дж/моль/°K)   |
| B                 | Коэффициент для молярной теплоемкости нагнетаемого воздуха при постоянном давлении (например, Дж/моль/°K <sup>2</sup> )   |
| C                 | Коэффициент для молярной теплоемкости нагнетаемого воздуха при постоянном давлении (например, Дж/моль/°K <sup>3</sup> )   |
| FMASS             | Доля дополнительно всасываемой массы  |

## Дополнительные 2 карты для опции HYBRID\_JETTING

Следующие две карты вводятся для расчета по гибридным моделям впуска струи HYBRID\_JETTING. Струю можно определить заданием либо координат фокуса струи, конца вектора струи и фокуса вторичной струи, либо трех узлов, расположенных в этих точках. Если положение подушки меняется как функция времени, рекомендуется использовать узловые точки.

Карта 1                    1                    2                    3                    4                    5                    6                    7                    8

|            |      |      |      |      |      |      |     |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|-----|------|
| Переменная | XJFP | YJFP | ZJFP | XJVH | YJVH | ZJVH | CA  | BETA |
| Тип        | F    | F    | F    | F    | F    | F    | F   | F    |
| Умолчание  | нет  | нет  | нет  | нет  | нет  | нет  | нет | нет  |
| Примечания | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    |     |      |

Карта 2                    1                    2                    3                    4                    5                    6                    7                    8

|            |       |       |       |      |      |       |       |       |
|------------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|
| Переменная | XSJFP | YSJFP | ZSJFP | PSID | IDUM | NODE1 | NODE2 | NODE3 |
| Тип        | F     | F     | F     | I    | F    | I     | I     | I     |
| Умолчание  | нет   | нет   | нет   | нет  | нет  | 0     | 0     | 0     |
| Примечания |       |       |       |      | 2    | 1     | 1     | 1     |

### ПЕРЕМЕННАЯ

### ОПИСАНИЕ

|      |   |
|------|---|
| XJFP | Координата x фокуса струи, т.е. воображаемого начала на рис. 1.1. См. замечание 1 ниже. |
| YJFP | Координата y фокуса струи, т.е. воображаемого начала на рис. 1.1.                       |
| ZJFP | Координата z фокуса струи, т.е. воображаемого начала на рис. 1.1.                       |
| XJVH | Координата x конца вектора струи для определения оси конуса                             |

| <u>ПЕРЕМЕННАЯ</u> | <u>ОПИСАНИЕ</u>  |
|-------------------|--|
| YJVH              | Координата $y$ конца вектора струи для определения оси конуса  |
| ZJVH              | Координата $z$ конца вектора струи для определения оси конуса  |
| CA                | Угол конуса $\alpha$ в радианах<br>< 0.0: $ \alpha $ - это идентификатор нагрузочной кривой, определяющей угол конуса как функцию <i>времени</i>   |
| BETA              | Коэффициент эффективности $\beta$ для пересчета окончательного значение давления, полученного из уравнения Бернулли<br>< 0.0: $ \beta $ - это идентификатор задающей кривой, определяющей коэффициент эффективности как функцию <i>времени</i> |
| XSJFP             | Координата $x$ фокуса вторичной струи, подушка пассажира. Если координаты вторичного фокуса равны (0,0,0), предполагается коническая струя (подушка водителя).   |
| YSJFP             | Координата $y$ вторичного фокуса   |
| ZSJFP             | Координата $z$ вторичного фокуса   |
| PSID              | Идентификатор дополнительного набора частей, см. *SET_PART. Если он равен нулю, все элементы включены в подушку.   |
| IDUM              | Поле манекена (переменная не используется)   |
| NODE1             | Идентификатор узла, расположенного в фокусе струи, т.е. воображаемое начало на рис. 1.1. См. замечание 1 ниже.   |
| NODE2             | Идентификатор узла на оси струи  |
| NODE3             | Идентификатор дополнительного узла, расположенного в фокусе вторичной струи  |

**Примечания:**

1. Предполагается, что направление струи определяется с помощью метода координат (XJFP, YJFP, ZJFP) и (XJVH, YJVH, ZJVH), если не заданы NODE1 и NODE2. В этом случае координаты узлов, заданных переменными NODE1, NODE2 и NODE3, заменяют XJFP, YJFP, ZJFP и XJVH, YJVH, ZJVH. Если подушка подчиняется движению абсолютно твердого тела, рекомендуется использовать узлы. Узлы должны быть связаны с автомобилем, чтобы координаты струи менялись в соответствии с движением автомобиля.

Опция впуска дает простую модель для расчета реального распределения давления в подушке в момент удара о препятствие и начала разворачивания подушки. Повышенное давление действует только на те поверхности, которые находятся в прямой видимости по отношению к воображаемому началу струи. С помощью необязательной задающей кривой LCRJV распределение давления может быть пересчитано в соответствии с так называемым распределением относительной скорости струи.

Для подушки пассажира конус заменяется клиновидной фигурой. Первичный и вторичный фокусы струи определяют грани клина, а угол  $\alpha$  определяет угол клина.

Вместо того чтобы прикладывать давление ко всем поверхностям в прямой видимости от воображаемого начала (начал), можно задать набор частей, к которым прикладывается давление.

2. Переменная IDUM не используется. Она была включена для того, чтобы сохранить формат данных таким же, как в опциях WANG\_NEFSKE\_JETTING.

**Дополнительные карты для опции HYBRID\_CHEMKIN**

Для расчета по гибридной модели Чемкина используются 3 управляющие карты. Для каждого типа газа вводится дополнительный набор карт, состоящий из управляющей карты и нескольких карт, которые задают термодинамические свойства.

Карта 1            1            2            3            4            5            6            7            8

|            |       |       |      |      |      |      |     |  |
|------------|-------|-------|------|------|------|------|-----|--|
| Переменная | LCIDM | LCIDT | NGAS | DATA | ATMT | ATMP | RG  |  |
| Тип        | I     | I     | I    | I    | F    | F    | F   |  |
| Умолчание  | нет   | нет   | нет  | нет  | нет  | нет  | нет |  |

Карта 2            1            2            3            4            5            6            7            8

|            |       |  |  |  |  |  |  |  |
|------------|-------|--|--|--|--|--|--|--|
| Переменная | HCONV |  |  |  |  |  |  |  |
| Тип        | F     |  |  |  |  |  |  |  |
| Умолчание  | 0.    |  |  |  |  |  |  |  |

Карта 3            1            2            3            4            5            6            7            8

|            |     |     |  |  |  |  |  |  |
|------------|-----|-----|--|--|--|--|--|--|
| Переменная | C23 | A23 |  |  |  |  |  |  |
| Тип        | F   | F   |  |  |  |  |  |  |
| Умолчание  | 0.  | 0.  |  |  |  |  |  |  |

**ПЕРЕМЕННАЯ**

**ОПИСАНИЕ**

LCIDM

Задающая кривая, определяющая зависимость массового расхода на входе от времени.

> 0: кусочно-линейная интерполяция,

< 0: интерполяция с помощью кубического сплайна.

| <u>ПЕРЕМЕННАЯ</u> | <u>ОПИСАНИЕ</u>   |
|-------------------|---|
| LCIDT             | Задающая кривая, определяющая зависимость температуры газа на входе от времени.<br>> 0: кусочно-линейная интерполяция<br>< 0: интерполяция с помощью кубического сплайна  |
| NGAS              | Число типов газа, для которых далее вводятся данные (включая первоначальный воздух)   |
| DATA              | Термодинамические данные<br>= 1: база данных NIST (необходимо ввести 3 дополнительных карты со свойствами),<br>= 2: база данных CHEMKIN (дополнительные карты не вводятся),<br>= 3: полиномиальные данные (необходимо ввести 1 дополнительную карту со свойствами). |
| ATMT              | Температура атмосферного воздуха  |
| ATMP              | Давление атмосферного воздуха   |
| RG                | Универсальная газовая постоянная  |
| HCONV             | Коэффициент конвективной теплоотдачи  |
| C23               | Коэффициент пропускания отверстия   |
| A23               | Площадь отверстия   |

Для каждого типа газа вводится набор карт, состоящий из контрольной карты и нескольких карт с данными о термодинамических характеристиках. Ввод данных прекращается заданием карты, содержащей символ “\*”.

### Управляющая карта

| Карта 1    | 1      | 2   | 3     | 4     | 5      | 6 | 7 | 8 |
|------------|--------|-----|-------|-------|--------|---|---|---|
| Переменная | CHNAME | MW  | LCIDN | FMOLE | FMOLET |   |   |   |
| Тип        | A      | F   | I     | F     | F      |   |   |   |
| Умолчание  | нет    | нет | 0     | нет   | 0.     |   |   |   |

| <u>ПЕРЕМЕННАЯ</u> | <u>ОПИСАНИЕ</u>  |
|-------------------|--|
| CHNAME            | Химический символ данного типа газа (например, N2 для азота, AR для аргона)<br><br>Обязательно задается для DATA=2 (CHEMKIN) и не обязательно для DATA=1 или DATA=3. |
| MW                | Молекулярный вес данного типа газа   |
| LCIDN             | Идентификатор задающей кривой, определяющей зависимость молярной доли на входе для данного типа газа от времени. Если >0, то переменная FMOLE не используется.       |
| FMOLE             | Молярная доля данного типа газа во входном потоке  |
| FMOLET            | Начальная молярная доля данного типа газа в резервуаре   |

**Дополнительные карты с данными о термодинамических характеристиках.**

Дополнительные карты не вводятся при использовании базы данных CHEMKIN (DATA=2). Но файл с этой базой данных и с именем chemkin должен присутствовать в той же директории, которая используется для расчета по программе LS-DYNA.

**Если DATA=1, необходимо ввести следующие 3 карты для базы данных NIST.** Необходимые данные находятся на сайте: <http://webbook.nist.gov/chemistry/>

Карта 1                    1                    2                    3                    4                    5                    6                    7                    8

|            |      |      |       |  |  |  |  |  |
|------------|------|------|-------|--|--|--|--|--|
| Переменная | TLOW | TMID | THIGH |  |  |  |  |  |
| Тип        | F    | F    | F     |  |  |  |  |  |
| Умолчание  | нет  | нет  | нет   |  |  |  |  |  |

Карта 2

|            |          |          |          |          |          |          |          |  |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--|
| Переменная | a<br>low | b<br>low | c<br>low | d<br>low | e<br>low | f<br>low | h<br>low |  |
| Тип        | F        | F        | F        | F        | F        | F        | F        |  |
| Умолчание  | нет      |  |

Карта 3

|            |           |           |           |           |           |           |           |  |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--|
| Переменная | a<br>high | b<br>high | c<br>high | d<br>high | e<br>high | f<br>high | h<br>high |  |
| Тип        | F         | F         | F         | F         | F         | F         | F         |  |
| Умолчание  | нет       |  |

**ПЕРЕМЕННАЯ****ОПИСАНИЕ**

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| TLOW                        | Нижний предел температуры для аппроксимирующей кривой   |
| TMID                        | Среднее значение температуры для аппроксимирующей кривой  |
| THIGH                       | Верхний предел температуры для аппроксимирующей кривой  |
| $a_{low}, \dots, h_{low}$   | Коэффициенты для аппроксимации с помощью полиномов в интервале низких температур базы данных NIST (см. ниже)  |
| $a_{high}, \dots, h_{high}$ | Коэффициенты для аппроксимации с помощью полиномов в интервале высоких температур базы данных NIST (см. ниже) |

**Если DATA=3, необходимо ввести следующую карту для аппроксимации с помощью полиномов.**

Карта 1            1            2            3            4            5            6            7            8

|            |     |    |    |    |    |  |  |  |
|------------|-----|----|----|----|----|--|--|--|
| Переменная | a   | b  | c  | d  | e  |  |  |  |
| Тип        | F   | F  | F  | F  | F  |  |  |  |
| Умолчание  | нет | 0. | 0. | 0. | 0. |  |  |  |

**ПЕРЕМЕННАЯ****ОПИСАНИЕ**

|   |                       |
|---|-----------------------|
| a | Коэффициент, см. ниже |
| b | Коэффициент, см. ниже |
| c | Коэффициент, см. ниже |

| <u>ПЕРЕМЕННАЯ</u> | <u>ОПИСАНИЕ</u>       |
|-------------------|-----------------------|
| d                 | Коэффициент, см. ниже |
| e                 | Коэффициент, см. ниже |

Уравнения кривых для аппроксимации теплоемкости:

NIST: 
$$c_p = \frac{1}{M} \left( a + bT + cT^2 + dT^3 + \frac{e}{T^2} \right)$$

СНЕМКИН: 
$$c_p = \frac{\bar{R}}{M} (a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4)$$

$\bar{R}$  – универсальная газовая постоянная (8.314 Нм /моль · К),  
M – молекулярный вес газа.

Полином: 
$$c_p = \frac{1}{M} (a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4)$$